



UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI  
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO ETAPA II

**GERAÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DA UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS  
ORGÂNICOS DA INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA DO RAMO DE *CANDIES***

Vinicius Paini

Lajeado, novembro de 2017

Vinicius Paini

## **GERAÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DA UTILIZAÇÃO RESÍDUOS ORGÂNICOS DA INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA DO RAMO DE *CANDIES***

Trabalho de Conclusão de Curso Etapa II, apresentado ao Curso de Engenharia Ambiental, ao Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, da Universidade do Vale do Taquari UNIVATES, como parte da exigência para obtenção de título de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof<sup>a</sup>. Dra. Maria Cristina de Almeida Silva

Lajeado, novembro de 2017

## RESUMO

As atividades humanas têm gerado diversos tipos de resíduos que possuem potencial, tanto para o aproveitamento energético como para a reciclagem. Devido à possibilidade de esgotamento das fontes de energia e recursos naturais, a sociedade tem se empenhado na busca por novas fontes de energias renováveis com o propósito de diversificar a corrente matriz energética. Uma forma de energia renovável é o biogás produzido pelo processo biológico de digestão da matéria orgânica. Sendo assim, o presente trabalho de conclusão de curso avaliou, em escala de laboratório, a geração e qualidade do biogás gerado utilizando como inoculo lodo anaeróbio de estação de tratamento de efluentes e como substrato resíduo orgânico de processo proveniente da produção de balas e *marshmallows*. Para a execução dos experimentos foi utilizada a estrutura do Laboratório de Biorreatores da Universidade do Vale do Taquari. Foram utilizados 10 reatores, operados sob a forma descontínua alimentada, inserindo-se substrato semanalmente, com a quantidade equivalente a uma unidade de cada produto a ser testado. Durante os experimentos foram monitorados o volume de biogás gerado e a concentração de metano. Esses parâmetros alcançaram a produção de biogás 40.635,2mL com 58,47% de metano para bala de goma, 42.227,7mL com 63,37% de metano para o chicle e 51.429,4mL com 68,61% de metano para o *marshmallow*. Ao término dos experimentos, que duraram 134 dias, foram realizados ensaios de DQO, sólidos voláteis, nitrogênio e fósforo que apontaram a eficiência do inoculo para digestão dos produtos testados. Os resultados obtidos para nitrogênio e fósforo indicam que a mistura reacional após a digestão anaeróbia possui grande potencial para ser aproveitado como biofertilizante.

**Palavras-Chave:** Biogás, Biodigestão anaeróbia, resíduo orgânico, lodo e energia renovável.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Biodigestor modelo indiano .....	24
Figura 2 - Campânula biodigestor modelo indiano .....	25
Figura 3 - Biodigestor modelo chinês .....	26
Figura 4 - Construção biodigestor modelo chinês .....	26
Figura 5 - Esquema biodigestor modelo canadense .....	27
Figura 6 - Biodigestor modelo canadense .....	27
Figura 7 - Fluxograma do processo de digestão anaeróbia .....	29
Figura 8 - Balas de goma .....	41
Figura 9 - Marshmallows .....	41
Figura 10 - Chicle recheado .....	42
Figura 11 - Reatores de vidro .....	45
Figura 12 - Reatores conectados as mangueiras de silicone da incubadora .....	46
Figura 13 - Mangueiras de silicone ligadas aos tubos em formato de U (Sistema de medição de biogás) .....	46
Figura 14 - Incubadora .....	47
Figura 15 - Tubo em formato de U .....	48
Figura 16 - Controlador com circuito eletrônico .....	49
Figura 17 - Equipamento para qualificação do metano .....	51
Figura 18 - Phmetro utilizado no experimento .....	52
Figura 19 - Caixa de kits NANOCOLOR para teste rápido de DQO .....	54
Figura 20 - Tubos de ensaio do teste rápido de DQO .....	55
Figura 21 - Instrumentos utilizados para realização do procedimento .....	55
Figura 22 - Bloco de aquecimento para digestão MN Nanocolor Vario C2 .....	56
Figura 23 - Fotômetro multiparâmetros MN PF-12 PLUS .....	56

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Quantidades de combustíveis equivalentes energeticamente a 1m <sup>3</sup> de biogás.....	21
Tabela 2 - Volume correspondente a 1 unidade de produto .....	47
Tabela 3 - Carga orgânica aplicada no primeiro teste preliminar .....	59
Tabela 4 - Carga orgânica aplicada no segundo teste preliminar .....	60
Tabela 5 - Carga orgânica dos substratos.....	62
Tabela 6 - Volumes totais de biogás e metano .....	64
Tabela 7 - Resultados obtidos para bala de goma .....	66
Tabela 8 - Resultados obtidos para chicle .....	68
Tabela 9 - Resultados obtidos para o marshmallow.....	71
Tabela 10 - Resultados de sólidos voláteis totais.....	75
Tabela 11 - Valores de concentração de nitrogênio e fósforo. ....	77

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Produção de biogás.....	63
Gráfico 2 - Produção de metano .....	63
Gráfico 3 - Volumes de biogás versus metano nos reatores da bala de goma.....	67
Gráfico 4 - Volume de biogás versus metano nos reatores do chicle.....	69
Gráfico 5 - Volume de Biogás versus metano nos reatores do marshmallow .....	72
Gráfico 6 - Acompanhamento do parâmetro pH.....	73

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AGV Ácidos Graxos Voláteis

C Carbono

CH<sub>4</sub> Metano

CO<sub>2</sub> Gás Carbônico

DBO Demanda Bioquímica de Oxigênio

DQO Demanda Química de Oxigênio

H<sub>2</sub> Hidrogênio

H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> Ácido Sulfúrico

K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> Dicromato de Potássio

N Nitrogênio

P Fósforo

pH Potencial Hidrogeniônico

SF Sólidos Fixos

SV Sólidos Voláteis

ST Sólidos Totais

SV Sólidos Voláteis

TDH Tempo de Detenção Hidráulica

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
1.1 Objetivo geral .....	13
1.2 Objetivos específicos .....	13
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>14</b>
2.1 Resíduos sólidos.....	14
2.2 Energia e sua importância .....	15
2.3 Problemas decorrentes do uso de combustíveis fósseis .....	15
2.4 Energias renováveis.....	16
2.5 Biogás .....	18
2.5.1 Aproveitamento energético do biogás.....	19
2.5.2 Equivalência e conversão energética do biogás .....	21
2.5.3 Limpeza do biogás .....	22
2.6 Biofertilizante.....	22
2.7 Biodigestores .....	23
2.7.1 Biodigestor modelo indiano .....	24
2.7.2 Biodigestor modelo chinês .....	25
2.7.3 Biodigestor modelo canadense .....	27
2.8 Digestão anaeróbia .....	28
2.8.1 Hidrólise .....	29
2.8.2 Acidogênese .....	30
2.8.3 Acetogênese .....	31
2.8.4 Metanogênese .....	31
2.8.5 Fatores de influência na atividade anaeróbia.....	32



2.8.5.1 Temperatura.....	33
2.8.5.2 pH .....	34
2.8.5.3 Alcalinidade.....	34
2.8.5.4 Nutrientes.....	35
2.8.5.5 Toxicidade.....	36
2.8.5.6 Tempo de detenção hidráulica .....	37
2.8.5.7 Impermeabilidade ao oxigênio .....	37
2.8.5.8 Retenção de biomassa .....	37
2.8.5.9 Substratos utilizados para digestão anaeróbia.....	38
 <b>3 METODOLOGIA .....</b>	 <b>40</b>
3.1 Substratos utilizados e origem .....	40
3.2 Inoculo .....	43
3.3 Testes preliminares.....	43
3.4 Materiais utilizados.....	44
3.5 Reatores operados em batelada alimentada e acondicionados em incubadora adaptada .....	44
3.6 Quantificação do biogás.....	48
3.7 Métodos de análise e monitoramento dos experimentos .....	49
3.7.1 Tempo de detenção hidráulico .....	50
3.7.2 Qualificação do biogás.....	50
3.7.3 Medição do pH.....	51
3.7.4 Determinação de sólidos voláteis totais (SVT).....	52
3.7.5 Determinação de demanda química de oxigênio (DQO).....	53
3.7.6 Determinação de nitrogênio total Kjeldahl (NTK) .....	57
3.7.7 Determinação de fósforo total .....	58
 <b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	 <b>59</b>
4.1 Testes preliminares.....	59
4.2 Início do experimento .....	61
4.3 Geração de biogás x produção de metano .....	63
4.4 Bala de goma.....	65
4.5 Chicle .....	68
4.6 <i>Marshmallow</i> .....	70

4.7 pH .....	72
4.8 Demanda química de oxigênio (DQO) .....	74
4.9 Sólidos voláteis totais.....	75
4.10 Biofertilizante.....	76
 <b>5 CONCLUSÃO .....</b>	 79
5.1 Sugestões para trabalhos futuros .....	80
 <b>6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	 81

## 1 INTRODUÇÃO

O constante crescimento da população mundial, aliado ao consumo excessivo de recursos naturais e ao crescimento desordenado, provocam incremento na demanda por alimentos e produtos industrializados e, conseqüentemente, por energia. Nesse contexto, pressupõe-se que os resíduos das atividades humanas e industriais possuem uma parcela significativa de matéria orgânica passível de conduzir a um descontrole ambiental quando gerenciados de maneira incorreta (HARRIS & ROACH et al., 2013).

A revolução industrial é considerada um marco, pelo aumento substancial do consumo de energia, tornando indispensável a ampliação de sua geração, passando a utilizar fontes como gás, carvão e petróleo para essa finalidade (GOLDENBERG et al., 2007). O abastecimento de energia para a continuidade das atividades humanas é um dos principais contribuintes para a emissão dos gases promotores do efeito estufa, por meio da queima de combustíveis fósseis que libera grandes quantidades de CO<sub>2</sub> para a atmosfera (HOOK & TANG et al., 2013).

Nas próximas décadas, as fontes de energia renováveis terão participação cada vez mais explícita na matriz energética global (PROINFA, 2013). Com o atual cenário mundial, não existe a possibilidade de solucionar o problema energético apenas com uma fonte de energia única. A aposta deve ser em tecnologias que vêm sendo estudadas e desenvolvidas, baseadas em fontes de energia renováveis como: sol, água, vento, biomassa e bio-resíduos (CARRILHO et al., 2012).

Um assunto largamente debatido em termos de biogás, é a utilização de resíduos orgânicos para sua geração e seu aproveitamento para fins energéticos.

Antes o biogás era visto apenas como subproduto da degradação anaeróbia de resíduos de origem orgânica, seja ele gerado por aterros de resíduos, estações de tratamento de efluentes (ETEs), digestão anaeróbia de biomassa residual, biodigestão de resíduos provenientes de cultivos (SALOMON & LORA et al., 2009).

O acesso a novas tecnologias é viabilizado através da utilização de fontes de energia renováveis, contribuindo para reduzir os impactos ambientais ocasionados pelas atividades humanas. O surgimento de fontes de energia renováveis vem para reforçar a racionalização do potencial energético disponível e complementar as fontes energéticas já existentes (LINDEMEYER et al., 2008).

A digestão anaeróbia da matéria orgânica ocorre na ausência de oxigênio e tem como produto a geração de biogás. Esse processo pode ser dividido em quatro etapas sequenciais que ocorrem de forma simultânea no interior do reator. São elas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. Para que o processo de degradação anaeróbia da matéria orgânica obtenha sucesso, é necessária certa simbiose e coordenação entre as bactérias fermentativas e metanogênicas (LORA & VENTURINI et al., 2012).

Para que todas etapas do processo de degradação da matéria orgânica ocorram de forma eficiente, favorecendo a manutenção da condição ótima para a produção de biogás, é necessário que alguns fatores essenciais sejam observados. Os fatores de maior relevância são temperatura, pH, quantidade de nutrientes, tempo de detenção hidráulica, relação Carbono/Nitrogênio (C/N) e concentração de sólidos (SANT'ANNA et al., 2010). O metano ( $\text{CH}_4$ ) é o principal constituinte do biogás e, é responsável pela determinação do seu potencial energético (KONRAD et al., 2010).

Os resíduos orgânicos utilizados para a realização dos experimentos deste trabalho, são provenientes do processo de produção de balas e doces, e são constituídos basicamente por açúcares e amido, materiais considerados de fácil degradação pelo processo anaeróbio.

A busca pelo aproveitamento energético do resíduo para a geração de energia é vista como alternativa mais interessante do ponto de vista econômico quando comparada com outros meios de tratamento existentes, como alimentação animal ou

compostagem. O presente trabalho busca verificar a quantidade e qualidade do biogás gerado pelos resíduos citados acima, via digestão anaeróbia. Serão empregados reatores de alimentação descontínua por batelada, para verificar a viabilidade do aproveitamento do potencial energético, podendo contribuir para redução de custos com tratamento de resíduos.

### **1.1 Objetivo geral**

Avaliar a produção de biogás, em escala laboratorial, empregando como substrato resíduos sólidos orgânicos provenientes do processo produtivo de doces.

### **1.2 Objetivos específicos**

I - Avaliar a produção de biogás, identificando o teor de metano presente quando utilizadas diferentes proporções de resíduos sólidos orgânicos provenientes da fabricação de doces;

II - Caracterizar o substrato pós digestão obtido nos experimentos através de análises físico-químicas para verificar a possibilidade de incorporação em solo como adubo orgânico.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Resíduos sólidos

Nos últimos 40 anos, os países desenvolvidos avançaram muito no conceito de resíduos sólidos, evoluindo do *status* de remoção dos resíduos de um local para depositá-los em outro, para um novo *status*, em que a prioridade é a não geração ou redução da geração. A adoção de processos de tratamento mais eficientes traz vantagens como maximização da reciclagem de materiais e valorização da recuperação energética. Desta forma proporciona-se a disposição mais segura em termos de saúde pública, economia e preservação do meio ambiente (CASSINI et al., 2003).

Porém, nos países em desenvolvimento, como no Brasil, a evolução no conceito de resíduos sólidos, fruto de pressões sociais e ambientais, veio à tona somente nos últimos 30 anos. Alguns municípios, comunidades organizadas, indústrias e governos locais passaram a se mobilizar e induzir a segregação e classificação dos resíduos nas fontes geradoras (IBGE, 2010). Resíduos orgânicos bem segregados contribuem para o bom funcionamento do processo de digestão anaeróbia e a redução do volume de resíduos nos aterros sanitários (MAYER et al., 2013).

Nos centros urbanos, os principais problemas enfrentados no âmbito ambiental e socioeconômico, estão ligados ao gerenciamento de resíduos sólidos, apresentando como pontos críticos a coleta, segregação e destinação. A maior parte dos resíduos sólidos despejados nas células dos aterros possuem grande fração

orgânica (CASSINI et al., 2003). Os processos mais comuns para tratamento da fração orgânica dos resíduos sólidos são a compostagem e a digestão anaeróbia (ZHU et al., 2009). A digestão anaeróbia é vista como a alternativa mais viável por permitir a estabilização e redução significativa do volume da fração orgânica, e também oportuniza a valoração energética do biogás (SOUTO, 2005).

## **2.2 Energia e sua importância**

Energia é um recurso fundamental para o sustento da vida no planeta. Sua escassez é tida como tema em discussões envolvendo a sociedade atual, a indústria e as lideranças governamentais (GOLDEMBERG e PALETTA et al., 2012).

O avanço da sociedade tem sido apontado como principal motivo para o aumento do consumo de recursos naturais, causando sua escassez. Esse fato torna fundamental a busca por formas mais eficientes de extração, aproveitamento, manejo e utilização de tais recursos. A busca por fontes de energias mais eficientes, que causem o mínimo de impacto ao meio ambiente, é o principal objetivo de muitos estudos relacionados à área de energias (GOLDENBERG et al., 2007).

Conforme dados levantados por Capaz et al. (2014), em 2012 a população mundial consumiu cerca de 522,3 EJ (Exajoules) de energia, sendo que cerca de 91% provém de recursos não renováveis, e apenas 8,6% são obtidos de fontes renováveis. Nos países desenvolvidos, a participação de energias renováveis na matriz energética não foi superior a 5%, em decorrência do baixo custo e disponibilidade das fontes não renováveis.

## **2.3 Problemas decorrentes do uso de combustíveis fósseis**

A problemática dos combustíveis fósseis é evidenciada pelos investimentos cada vez mais elevados para extração, e pela exaustão das reservas desses recursos. Nesse contexto, fica clara a importância em buscar e desenvolver energias renováveis, que contribuam para a redução da dependência imposta pelo petróleo, já

que o mesmo impacta o meio ambiente, seja pela sua extração, ou seja pela poluição decorrente do seu uso (GOLDEMBERG e PALETTA et al., 2012).

Nos anos 70, quando ocorreu a primeira crise do petróleo, no Brasil foi implementado um programa que incentivava o uso do etanol como alternativa à gasolina, sendo muito promissor no início. Após alguns anos, promoveu uma série de problemas, como elevação da dívida pública, em função dos benefícios concedidos aos produtores de cana-de-açúcar, aumento de latifúndios e a elevação nos preços de alguns alimentos. Em 1990, a queda do valor do barril de petróleo contribuiu para o retorno dos veículos movidos a gasolina. Na década de 1990, em razão da preocupação com a preservação da qualidade do meio ambiente, principalmente com vista para o controle do aquecimento global, a busca por fontes de energia alternativas voltou à tona no mundo inteiro (GOLDEMBERG e PALETTA et al., 2012).

No Brasil, a geração de energia elétrica é proveniente principalmente do potencial hidráulico, seguido pela geração térmica. Contudo, o país também dispõe de outras fontes alternativas para geração de energia elétrica, e dentro destas destaca-se a biomassa (ANEEL, 2008).

## **2.4 Energias renováveis**

Fontes renováveis de energia são aquelas provenientes de fontes renováveis ou que se regeneram com certa rapidez na natureza. Exemplos de fontes renováveis são o potencial hidráulico (quedas d' água), eólico, energia das marés, radiação solar, calor do centro da Terra. Neste contexto, também se enquadra a biomassa, que engloba diversas subcategorias como lenha, biocombustível, resíduos agrícolas e o biogás (GOLDEMBERG et al., 2007).

O biodiesel é considerado o principal biocombustível produzido pelo Brasil, e é produzido a partir de espécies vegetais oleaginosas como mamona, dendê, canola, girassol, amendoim, soja e algodão ou a partir de sebo bovino ou gordura suína. O biodiesel é um combustível versátil, podendo ser utilizado de forma isolada ou em



mistura com o diesel. Desde 2010 no Brasil, o diesel comercializado possui adição de 8% de biodiesel (PETROBRÁS, 2017).

Além do biodiesel, o Brasil conta com a produção de etanol utilizando a cana-de-açúcar que apresenta bom rendimento em litros por hectare de produto. Todos os subprodutos da produção de etanol podem ser aproveitados como fertilizantes ou como na queima para cogeração de energia (PETROBRÁS, 2017).

Conforme dados divulgados pelo Ministério de Minas e Energia (MME, 2017) baseados no ranking elaborado pela Global Wind Energy Council (GWEC), organização internacional especializada em energia eólica, houve uma expansão de 2.014 Megawatts na geração de energia eólica no Brasil em 2016, que passou a ocupar a 5ª posição no ranking mundial de capacidade instalada. Os parques eólicos instalados no país correspondem a 6% da geração de energia. (BRASIL, 2017).

Em 2014, houve a primeira contratação de energia solar de geração pública centralizada (890 MW). Em 2015, mais dois leilões foram realizados, totalizando 2.653 MW contratados, com início de suprimento em 2017 e 2018. O potencial brasileiro para energia solar é enorme, principalmente na região Nordeste, a qual apresenta os maiores valores de irradiação solar global, com a maior média e a menor variabilidade anual, dentre todas as regiões geográficas. Os valores máximos de irradiação solar são observados na região central da Bahia e no noroeste de Minas Gerais. (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIAS, 2016).

Outra forma de energia renovável promissora é o biogás, que é produzido através da degradação de matéria orgânica por bactérias anaeróbias (DEUBLEIN & STEINHAUSER et al., 2008). O Brasil tem tudo para se destacar no cenário de produção de biogás, pois possui enorme potencial de resíduos agrícolas como vinhaça, palha e bagaço de cana-de-açúcar, palha de arroz, caroço de algodão, bagaço e caroço de frutas, além de resíduos urbanos como lixo, esgoto, resíduos de podas e capinas, e dejetos de animais, caso dos bovinos, suínos, frangos e até de peixes (Canal – Jornal da Bioenergia, 2016).

De acordo com o levantamento inédito, chamado de Atlas Brasileiro de Emissões de GEE e Potencial Energético na Destinação de Resíduos Sólidos,

atualmente o Brasil conta com 22 projetos que preveem o aproveitamento energético do biogás, o que equivale a uma capacidade instalada de 254 MW. (Canal – Jornal da Bioenergia, 2016).

## 2.5 Biogás

Com forte aplicação no setor agroindustrial, o uso do biogás como matéria prima para a geração de energia elétrica está diretamente ligado à sustentabilidade e tem se mostrado muito interessante, tanto para geração de energia elétrica como alternativa para a disposição de resíduos sólidos e efluentes orgânicos (LORA & VENTURINI et al., 2012; ABREU et al., 2014).

Pierobon et al. (2007) definem biogás como uma das várias formas de fixação da energia proveniente do sol sob a forma de energia química disponível através de uma queima simples. O biogás é um gás insolúvel, incolor, de baixa densidade e de modo geral inodoro, desde que não contenha impurezas em demasia. É constituído basicamente por  $\text{CH}_4$ , dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e outros gases em baixas concentrações como hidrogênio ( $\text{H}_2$ ), nitrogênio ( $\text{N}_2$ ), oxigênio ( $\text{O}_2$ ), ácido sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ), amônia ( $\text{NH}_3$ ) e monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ) (CASSINI et al., 2003).

O biogás é uma fonte de energia alternativa que tem ganhado força nas últimas décadas, por ser uma fonte de energia limpa, de baixo custo e que contribui com a redução do volume de resíduos sólidos encaminhados para aterros. Porém, Lora & Venturini et al. (2012) salientam, que a utilização do biogás não deve ser tida como a solução para os problemas energéticos do país, mas como uma complementação para a matriz atual, que deve ser composta por várias fontes alternativas.

Embora a primeira planta destinada para a produção de biogás tenha surgido em meados do século XIX, o biogás já é conhecido e utilizado há muitas décadas. Veloso et al. (2010) descrevem relatos do pesquisador italiano Alessandro Volta, datados de 1776, evidenciando a descoberta de gás metano incorporado nos “gases

dos pântanos”. Esse metano era resultado da decomposição de restos de vegetais em ambientes confinados com ausência de oxigênio.

Sganzerla (1983) apud Veloso et al. (2010) citam a cidade de Bombaim como berço do biodigestão, tendo documentos que apontam a instalação de um biodigestor no início do século XIX. Ainda em 1950, um biodigestor de alimentação contínua foi instalado por Patel na Índia. Na década de 60, Fry, um fazendeiro na África do Sul, desenvolveu estudos com biodigestores.

A China implantou os biodigestores buscando utilizar o biofertilizante produzido para suprir a demanda na produção de alimentos, enquanto a Índia buscou suprir o déficit energético no país, surgindo assim 2 modelos diferentes de biodigestores (GASPAR et al., 2003).

O uso de resíduos para geração de biogás traz vários benefícios diretos. Goldemberg & Paletta et al. (2012) consideram como benefícios diretos a diminuição da emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE), a preservação do solo, mananciais e águas subterrâneas, bem como a redução do volume de resíduos enviados para aterros sanitários ou industriais. Estas características contribuem para redução de impactos locais, regionais e globais. Atrelados os benefícios diretos, também se destacam os benefícios indiretos, como incentivos ao desenvolvimento tecnológico e geração de empregos (LORA & VENTURINI et al., 2012). Um ponto negativo do biogás é a densidade baixa do metano, que dificulta sua liquefação, fazendo com que ocupe volumes elevados, dificultando o armazenamento e transporte (RORATTO et al., 2014).

### **2.5.1 Aproveitamento energético do biogás**

O metano contido no biogás, quando queimado, libera uma energia útil ao homem, seja pelo uso direto do calor (aquecimento, geração de vapor, secagem em geral) ou da luz para iluminação de ambientes. Também pode ser empregado para ser convertido em outra forma de energia, como elétrica, através do uso em geradores

ou turbinas, ou energia cinética, através da utilização do gás em motores ou motobombas adaptados (ICLEI, 2010).

Dentre as finalidades do biogás, as mais comuns são a queima direta e a utilização como combustível em motogeradores a combustão (DIAZ et al., 2006). Tratando-se de energia elétrica, o biogás pode ser aproveitado, através da aplicação de módulos geradores que são implementados de acordo com o potencial energético do biodigestor ou do aterro (LORA & VENTURINI et al., 2012).

Conforme Metcalf & Eddy et al. (2003), sempre que houver a viabilidade técnica e econômica de aproveitamento o gás gerado deve ser aproveitado na própria estação de tratamento. Os autores salientam que o consumo de energia típico nas estações de tratamento norte-americanas representa em custos operacionais o valor de 30%. Conforme Jordão et al. (2014), para o Brasil esse número ainda não está bem definido, mas na ETE de Barueri, São Paulo, os gastos com energia representam 20% dos custos operacionais.

Iannicelli et al. (2008), afirmam que, em indústrias que aproveitam o biogás como combustível em caldeiras para obtenção de vapor, cada metro cúbico de biogás utilizado é economizado aproximadamente 0,8L de gasolina, 1,3L de álcool, 1,4 kg de carvão vegetal ou 2,7kg de madeira.

Em muitos casos, os equipamentos em que o biogás será utilizado ou entrará em contato exigem uma série de cuidados especiais, pois, devido a presença de  $H_2S$  e  $NH_3$ , o biogás é considerado um gás agressivo por contribuir na corrosão de metais. Quando entram em combustão, os compostos que contêm enxofre e amônia produzem sulfatos e óxidos de nitrogênio, substâncias consideradas poluentes do ar (LORA & VENTURINI et al., 2012).

O processo de queima do biogás é prejudicado por substâncias presentes em sua composição, como água e  $CO_2$ , pois as mesmas absorvem parte da energia gerada. Para evitar problemas de combustão por essas substâncias ou de corrosão por  $H_2S$  ou  $NH_3$ , é recomendada a lavagem do biogás (LORA & VENTURINI et al., 2012).

### 2.5.2 Equivalência e conversão energética do biogás

O poder calorífico do biogás é apontado pela pureza do conteúdo de metano presente. Quanto mais elevada a concentração de água, gás sulfídrico e outros componentes, menor será seu poder calorífico (RORATTO et al., 2014).

Farret (2010), considera a energia equivalente de 1 m<sup>3</sup> de biogás como 614.898 kcal. Partindo desse dado, pode-se comparar o biogás gerado por um biodigestor com outras fontes combustíveis, conforme apresentado na Tabela 1:

Tabela 1 - Quantidades de combustíveis equivalentes energeticamente a 1m<sup>3</sup> de biogás

Combustível	Quantidades equivalentes
Gasolina	0,61 a 0,70 litros
Álcool	0,80 litros
Óleo Diesel	0,55 litro
GLP	0,4 kg
Lenha	1,6 a 3,5 kg
Eletricidade	1,25 a 1,43 kWh

**Fonte:** Fundação Ecológica Natural (FEN) (2013)

Segundo Costa et al. (2006), conversão energética é o processo que transforma uma forma de energia em outra e, para que ocorra, existem várias tecnologias. Uma delas é a conversão de energia armazenada nas ligações químicas em energia mecânica através de um processo de combustão controlada. A energia mecânica serve como propulsora para um alternador que a converte em energia elétrica. Os autores citam outras formas de conversão, como a queima direta do biogás em caldeiras para cogeração ou energia térmica, turbinas a gás e motores a combustão são as tecnologias mais utilizadas para a conversão energética do biogás.

### 2.5.3 Limpeza do biogás

O biogás pode ter seu poder calorífico elevado quando submetido a tratamento limpeza para eliminar as impurezas e remover as substâncias que conferem características corrosivas, como o gás sulfídrico e a água (RORATTO et al., 2014).

Um processo simples, de fácil implantação e barato para remoção total do gás sulfídrico é o emprego de limalhas de ferro em um recipiente para passagem do biogás, pois o gás sulfídrico reage com o óxido de ferro, formando sulfeto. Esta técnica possibilita a remoção total do gás sulfídrico existente no biogás (BEDUSCHI; ORTLOLANI E COAN et al., 1985). Conforme Suzuki et al. (2011), a aplicação de glicóis sílica gel é uma técnica eficiente para a remoção de umidade presente no biogás, contribuindo para o rendimento calorífico.

## 2.6 Biofertilizante

Após a realização do processo de digestão, o substrato pode ser retirado do biodigestor na forma de biofertilizante, por ser rico em nutrientes (RORATTO et al., 2014). Conforme Barichello et al. (2015), o biofertilizante contribui para o desenvolvimento das bactérias presentes no solo, fazendo com que as lavouras apresentem incremento na produtividade. Contudo, cabe ressaltar que o teor de nutrientes contido no biofertilizante é dependente do substrato utilizado no biodigestor (KARLSSON et al., 2014).

O poder de poluição do substrato pode ser reduzido através da digestão anaeróbia. Além de o teor de carbono ser reduzido, também ocorre o aumento no teor de nutrientes, devido à conversão de carbono à  $\text{CH}_4$ . O pH do biofertilizante é em torno de 7,5, tornando-o apto para a correção da acidez do solo. Isto ocorre através da eliminação do alumínio e liberação do fósforo componente dos sais insolúveis de alumínio e ferro, o que dificulta a propagação fungos patogênicos no solo (GASPAR et al., 2003).

A utilização de biofertilizantes enriquece a qualidade do solo, tornando menos dificultosa a penetração das raízes. Além disso, também melhora absorção de umidade do subsolo, tornando o solo mais resistente a períodos de estiagem (BARICHELO et al., 2015). Segundo Karlsson et al. (2014), a utilização de biofertilizante tem proporcionado rendimentos muito próximos aos obtidos com aplicação de fertilizantes químicos. Quando disposto o biofertilizante no solo durante a semeadura, se obtém incremento de 20 cm nas plantas.

## **2.7 Biodigestores**

De acordo com Oliver (2008), biodigestor é um local em que ocorre fermentação de biomassa, podendo ser em um tanque, caixa ou vala revestida. O mais importante é que a estrutura utilizada seja vedada, a fim de evitar a entrada de oxigênio, criando um ambiente anaeróbio. Desta forma, os microrganismos presentes degradam a matéria orgânica, gerando biogás como principal produto e, biofertilizante como subproduto. Os únicos pontos não vedados são a entrada e saída.

O biodigestor é composto pelo gasômetro e pela câmara de digestão, possuindo funcionamento simplificado. Os dejetos ou a matéria orgânica a ser digerida é destinada para a câmara de digestão, e o biogás produzido pela fermentação anaeróbia é retido acumulando-se no gasômetro (GASPAR et al., 2003).

Roratto (2014) explica que o início do processo ocorre com a inserção do material a ser degradado na câmara de digestão, podendo ser realizada de forma contínua ou intermitente. Com o processo de degradação da matéria orgânica concluído, o material restante pode ser retirado do biodigestor e utilizado como fertilizante.

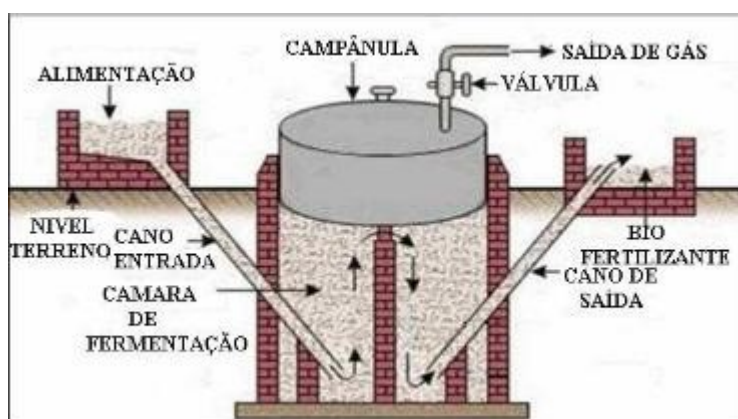
Os biodigestores dos modelos chinês e indiano são os mais conhecidos mundialmente. Contudo, alguns países projetaram outros modelos de biodigestores de acordo com a aplicação, buscando melhor eficiência e menor custo de implementação (HERCULANO e SOUZA et al., 2016). No Brasil, a Marinha desenvolveu um modelo barato e de fácil instalação, conhecido como modelo da

marinha. Feito de manta de policloreto de polivinila (PVC), é construído na horizontal com largura maior que a profundidade, para melhor aproveitamento do calor solar que contribui para elevação a taxa de biodigestão, apresentada como principal vantagem desse modelo. Pode ser utilizado em projetos agrícolas de vários portes, possuindo apenas uma desvantagem que é o custo da manta de PVC que cobre toda a extensão do biodigestor (FRANÇA JR, 2008).

### 2.7.1 Biodigestor modelo indiano

A principal característica desse modelo de biodigestor é a campânula utilizada como gasômetro. Essa campânula pode estar mergulhada direto no substrato ou em um selo de água externo, o que contribui para redução de perdas de biogás. Na parte interna, o tanque possui uma parede divisória que tem a função de forçar a movimentação do material por toda parte interna da câmara de fermentação, conforme ilustrado na Figura 1 (VELOSO et al., 2010).

Figura 1 - Biodigestor modelo indiano



Fonte: SEIXAS, 1980.

O modelo indiano trabalha com pressão interna constante. Sendo assim, à medida que o gás produzido não é consumido, o seu volume aumenta, deslocando o gasômetro verticalmente em razão da pressão, conforme mostrado na Figura 2 (RORATTO et al., 2014).



Figura 2 - Campânula biodigestor modelo indiano



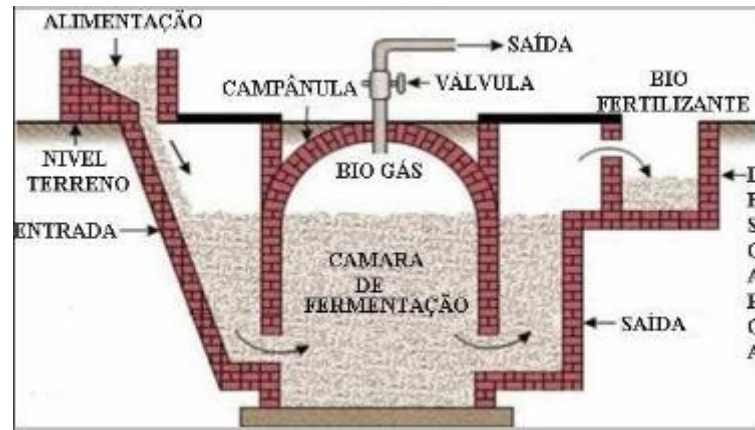
Fonte: SEIXAS, 1980.

A operação deste biogestor requer alimentação contínua e concentração de sólidos totais de no máximo 8%, para evitar entupimentos das tubulações e facilitar a circulação do substrato na câmara de fermentação. Sua construção é fácil, porém pode apresentar custo elevado para implantação de gasômetro de metal (DEGANUTTI et al., 2009).

### **2.7.2 Biodigestor modelo chinês**

Este digestor consiste em uma câmara, geralmente construída de alvenaria em formato cilíndrico de teto abobadado e impermeável, dispensando o uso de gasômetro de chapa de aço conforme ilustrado pelas Figuras 3 e 4. Por isso, os custos de implantação são reduzidos, porém pode apresentar vazamentos de biogás caso a estrutura não tenha vedação e impermeabilização satisfatória (DEGANUTTI et al., 2009).

Figura 3 - Biodigestor modelo chinês



Fonte: SEIXAS, 1980.

Figura 4 - Construção biodigestor modelo chinês



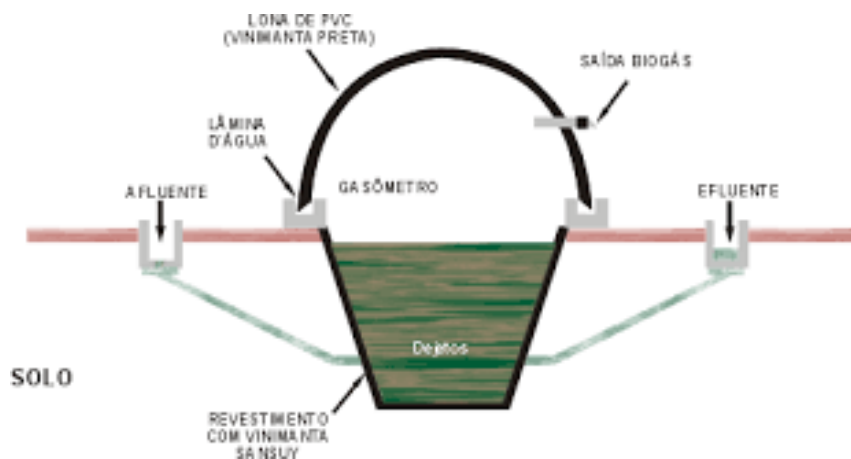
Fonte: Ecodomus

Este modelo é utilizado apenas em instalações de pequeno porte devido a uma parte do biogás ser liberada para a atmosfera com o objetivo de reduzir a pressão interna do biodigestor (VELOSO, et al., 2010). Assim como no modelo Indiano, este também requer alimentação contínua, e teor máximo de sólidos totais de 8% (DEGANUTTI et al., 2009).

### 2.7.3 Biodigestor modelo canadense

Este modelo possui estrutura simplificada, e em geral construído na horizontal. A câmara de biodigestão pode ser construída abaixo do nível do solo ou não. Sua largura é maior do que a profundidade do reservatório, e o gasômetro é constituído por uma manta maleável de PVC que infla conforme o volume de biogás armazenado no seu interior. A vedação é feita por uma lâmina de água em que a manta for imersa, conforme mostram as Figuras 5 e 6 (FRANÇA JR et al., 2008).

Figura 5 - Esquema biodigestor modelo canadense



Fonte: IENGEP (2012).

Figura 6 - Biodigestor modelo canadense



Fonte: Ecocitrus

Sua principal vantagem é a utilização do calor do sol para aumentar a taxa de biodigestão. O maior custo está atrelado a manta de PVC para o gasômetro. Ressalta-se como outra vantagem a sua fácil limpeza, devido a cúpula ser de manta de PVC facilitando sua retirada (RORATTO et al., 2014).

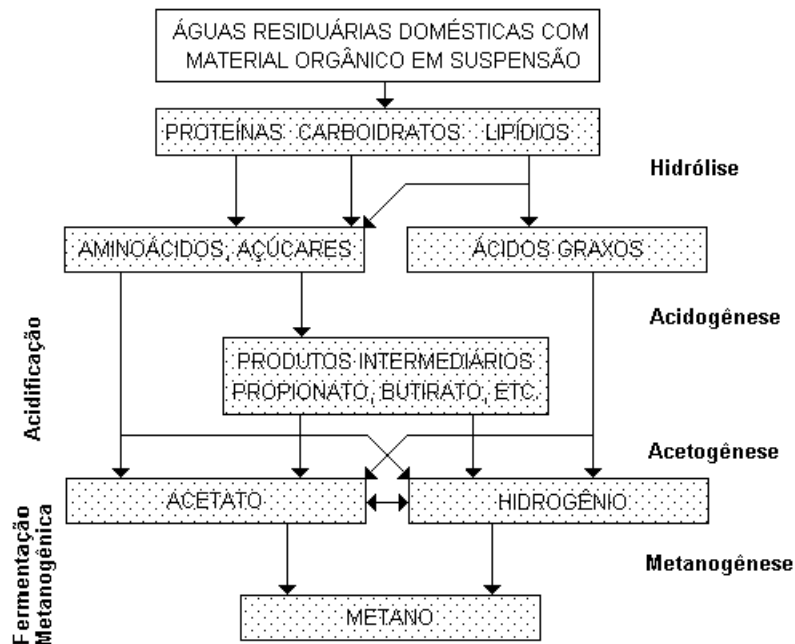
## **2.8 Digestão anaeróbia**

Segundo Goldemberg et al. (2010), a biomassa pode ser convertida em biogás através do processo de digestão anaeróbia. O biogás em geral contém cerca de 75% CH<sub>4</sub>, sendo o restante dividido entre CO<sub>2</sub> e impurezas como H<sub>2</sub>S.

Conforme Chernicharo et al. (1997) e Lora & Veturini et al. (2012), o processo de digestão anaeróbia é considerado de baixo consumo de energia e geração de biomassa. Pode ser comparado a um ecossistema, em que diversos grupos de microrganismos trabalham de forma conjunta na conversão da matéria orgânica em CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, água, H<sub>2</sub>S e amônia (NH<sub>3</sub>), além de sintetizar novas células bacterianas.

Os grupos de microrganismos atuantes na digestão anaeróbia têm ação simbiótica, tornando evidentes as etapas intermediárias do processo, indicando o grupo de microrganismos predominantes em cada uma. As reações bioquímicas que ocorrem no processo podem ser divididas em 4 etapas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese, conforme mostrado na Figura 7 (LORA & VENTURINI et al., 2012).

Figura 7 - Fluxograma do processo de digestão anaeróbia



Fonte: FERNANDES, 2009. Adaptado pelo autor.

Houve um grande avanço com estudos de digestão anaeróbia para estabilização de lodos secundários (ativados) e de tanques sépticos em reatores UASB. Partindo desses estudos foi avaliada a potencialidade na produção de energia e digestão de lodo em reatores sequenciais. Já foram desenvolvidos vários estudos do processo de hidrólise por vias química e térmica para aumento da disponibilidade de substrato para os microrganismos (CASSINI et al., 2003).

Pesquisas sobre digestão anaeróbia, tanto contínua como em batelada, em altas ou baixas taxas de concentração de sólidos, têm focado na degradação das frações orgânicas, na digestão em conjunto com lodos de ETEs, e tratamento anaeróbio de resíduos orgânicos (RSU) com recirculação de lixiviados (CASSINI et al., 2003).

### 2.8.1 Hidrólise

Os microrganismos não têm capacidade de assimilar a matéria orgânica particulada. Dessa forma, a primeira fase do processo de digestão anaeróbia consiste

na hidrólise dos materiais particulados (polímeros orgânicos), em materiais dissolvidos (moléculas menores) (GUIA PRÁTICO DE BIOGÁS, 2010).

De acordo com MAYER et al., 2013, no processo de hidrólise, os compostos constituintes de resíduos orgânicos como lipídios, carboidratos e proteínas são convertidos em ácidos graxos, açúcares e aminoácidos respectivamente. Essa primeira conversão ocorre por meio da atuação de exoenzimas excretadas pelas bactérias. Os compostos gerados, por possuírem menor tamanho, podem transpor as paredes celulares das bactérias fermentativas (TEIXEIRA et al., 2008; FARIA et al., 2012).

O processo de hidrólise ocorre de forma lenta, podendo ser fator limitante ao processo de digestão anaeróbia de resíduos orgânicos (RODRIGUES et al., 2005). Pode sofrer influência de diversos fatores como: temperatura de operação, composição do substrato, tempo de retenção do substrato, concentração de sólidos, pH e concentração de ácidos orgânicos voláteis (FARIA et al., 2012).

A temperatura está diretamente ligada e velocidade da reação de hidrólise. Em temperaturas mais elevadas a fase de hidrólise ocorre de forma acelerada. Concentrações baixas de sólidos melhoram o rendimento na solubilização do substrato pela conversão do material particulado (MAYER et al., 2013).

Leite et al. (2001) apontam a fase de hidrólise como responsável por relevantes reduções de nitrogênio e fósforo do substrato. Segundo os autores, grande parte desses nutrientes é solubilizada e lixiviada do interior do reator através de líquidos percolados

### **2.8.2 Acidogênese**

Os produtos da hidrólise são fermentados no interior das bactérias acidogênicas através do seu metabolismo fermentativo, e são excretados como substâncias orgânicas simples. Dentre as substâncias excretadas, destacam-se os ácidos graxos voláteis (AGV) (CHERNICHARO et al., 1997). Os produtos dessa fermentação são compostos mais simples, como ácidos orgânicos (ácidos acético,

butírico e propiônico), álcoois na forma de etanol, cetonas como acetona, CO<sub>2</sub> e hidrogênio (H<sub>2</sub>), além de novas células bacterianas (FARIA et al., 2012).

Em condições normais, os ácidos excretados pelas bactérias acidogênicas tendem a baixar o pH do substrato. Contudo, a mesma pode ser neutralizada por bicarbonatos, provenientes da própria degradação da matéria orgânica no processo de digestão anaeróbia. Em condições em que ocorrem acúmulo de AGV, a capacidade de tamponamento dos bicarbonatos tende a ser quebrada, causando inibição dos microrganismos, principalmente as bactérias metanogênicas responsáveis pela produção do biogás (BITTON et al., 2005).

### **2.8.3 Acetogênese**

As bactérias acetogênicas agem nos compostos gerados pela hidrólise e acidogênese, através da oxidação (CHERNICARO et al., 1997). Quando oxidados, o propionato e o butirato formam compostos que servem como substrato para as bactérias metanogênicas, como acetatos, H<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub> (FARIA et al., 2012).

A atividade das bactérias acetogênicas sofre interferência inibitória com o decréscimo de pH no meio aquoso. Esse decréscimo é ocasionado pela elevação da concentração de H<sub>2</sub> e AGVs, que mesmo em baixas concentrações são capazes de reduzir o valor do pH, o que inibe a produção de acetato. Portanto, para que as bactérias acetogênicas mantenham sua atividade, é necessário que as concentrações de acetato e de H<sub>2</sub> sejam mínimas (LORA & VENTURINI et al., 2012).

### **2.8.4 Metanogênese**

A conversão dos compostos orgânicos em metano no meio anaeróbio é realizada por microrganismos metanogênicos, classificados no domínio *Archaea*, um grupo diferente das bactérias típicas em decorrência de suas características genéticas. Esses organismos são encontrados na natureza, em ambientes anóxicos, pântanos, solos profundos e no trato intestinal de alguns animais. Os mesmos utilizam

como substrato um limitado grupo de compostos como substrato, como ácido acético, ácido fórmico,  $H_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ , metilaminas e metanol (CHERNICHARO et al., 1997).

Os microrganismos metanogênicos se dividem em dois grupos principais. Os metanogênicos acetoclásticos, que produzem  $CO_2$  e  $CH_4$  através do acetato que serve como fonte de energia, e os metanogênicos hidrogenotróficos, que produzem metano utilizando  $H_2$  como fonte de energia e  $CO_2$  (CHERNICHARO et al., 1997).

Os microrganismos metanogênicos agem sobre o  $H_2$  e o  $CO_2$ , convertendo-os em  $CH_4$ . A velocidade da cadeia de reações é limitada durante essa fase devido ao isolamento do contato do microrganismo com o meio, devido à formação de microbolhas de  $CO_2$  e  $CH_4$  em torno do mesmo. Uma forma melhorar a velocidade das reações nessa fase da degradação anaeróbia é a agitação da massa contida no reator, que promove o desprendimento das microbolhas presas aos microrganismos (BLEY JR; GALIKIN, 2009).

Conforme Rodrigues et al. (2005), os microrganismos responsáveis pela fase metanogênica apresentam crescimento de biomassa inferior se comparado ao crescimento das bactérias responsáveis pelas demais fases da digestão anaeróbia. Quando muito lento, esse crescimento pode fazer com que essa fase do processo de digestão anaeróbia passe a ser mais limitante do que hidrólise.

### **2.8.5 Fatores de influência na atividade anaeróbia**

Conforme Chernicharo et al. (1997), Sant'Anna Jr et al. (2010) e Lora & Venturini et al. (2012), para que o processo de digestão anaeróbia ocorra de forma contínua e eficiente visando a produção de biogás, é necessário considerar alguns fatores que podem ter influência sobre o processo. Os mesmos são descritos a seguir.



### 2.8.5.1 Temperatura

A temperatura é um fator físico que funciona como seletor das espécies microbianas, determinando sua presença e sua taxa de crescimento (CHERNICHARO et al., 1997). Para Lora & Venturini et al. (2012), o desenvolvimento da microbiota está associado a faixas de temperaturas do meio, que podem ser classificadas como:

- Faixa psicrófila: Com temperaturas que variam de 0 a 20°C.
- Faixa mesófila: Com temperaturas que variam de 20 a 45°C.
- Faixa termófila: com temperaturas que variam de 45 a 70°C.

Chernicharo et al. (1997) afirmam que o crescimento microbiano é possível em cada uma dessas 3 faixas. Os autores também atribuem o desenvolvimento das espécies a 3 valores de temperatura:

- Temperatura mínima: é a temperatura mínima para que ocorra crescimento bacteriano. Abaixo dela o crescimento não é possível;
- Temperatura ótima: é a temperatura que propicia o máximo crescimento bacteriano, propiciando o melhor desenvolvimento da biota;
- Temperatura máxima: é a temperatura máxima para ocorrência do desenvolvimento bacteriano. Acima dela também não é possível o crescimento.

Segundo Chernicharo et al. (1997), tratando-se de digestão anaeróbia, as faixas ótimas de temperatura são a mesófila (30 a 35°C) e a termófila (50 a 55 °C). Contudo, esta última é discutida por alguns autores, pois a partir de sua utilização, alguns problemas operacionais são decorrentes, como aquecimento dos reatores, instabilidade do processo e má qualidade do sobrenadante.

A comunidade microbiana responsável pela digestão anaeróbia pode apresentar capacidade de suportar pequenas variações de temperatura. Esta resistência pode não ser verificada quando ocorrem choques de temperatura por períodos mais extensos. Sendo assim, as mudanças na temperatura de grande amplitude, de forma brusca e por períodos prolongados, devem ser evitadas, para que

não ocorra má eficiência ou perda do sistema de digestão anaeróbia (SANT'ANNA et al., 2010).

#### **2.8.5.2 pH**

Outro fator de importância para a operação do sistema de digestão anaeróbia é o pH. O mesmo pode afetar o sistema, alterando a carga dos centros ativos das enzimas e modificando sua estrutura, o que pode elevar ou reduzir sua toxicidade (LORA & VENTURINI et al., 2012)

O pH ótimo é definido conforme o consórcio dos microrganismos presentes no sistema. De forma geral o pH ótimo é estabelecido na faixa neutra (LORA & VENTURINI et al., 2012). Segundo Chernicharo et al. (1997), a faixa ótima de pH para o crescimento dos organismos produtores de metano é de 6,6 a 7,4, podendo se operar com estabilidade na faixa de 6,0 a 8,0. Desta forma, valores fora dessa faixa poderão causar inibição nos microrganismos, prejudicando a reação.

Conforme Sant'Anna et al. (2010), o pH está associado de forma direta com a concentração de ácidos orgânicos e pelas relações de equilíbrio do  $\text{CO}_2$  no meio. Esses ácidos voláteis são resultado do equilíbrio das populações de microrganismos e a alcalinidade total do sistema. Portanto, desequilíbrios causam acúmulo de ácidos voláteis, que por sua vez, causam queda de pH no meio (LORA & VENTURINI et al., 2012).

#### **2.8.5.3 Alcalinidade**

Segundo Chernicharo et al. (1997), a alcalinidade pode ser entendida como a capacidade de uma solução em evitar mudanças no pH neutralizando ácidos. O tamponamento consiste na mistura de um ácido fraco com um sal correspondente a ele, tornando possível o agrupamento dos íons ácido ( $\text{H}^+$ ) e hidroxila ( $\text{OH}^-$ ), evitando variações de pH.

No processo de digestão, a alcalinidade consiste em neutralizar os ácidos formados no processo e evitar quedas de pH causadas por acumulação de ácidos voláteis (CHERNICHARO et al., 1997). Sendo assim, é um parâmetro fundamental para o controle do processo, sendo fundamental para manter a operação de reatores anaeróbios (SANT'ANNA et al., 2010).

#### **2.8.5.4 Nutrientes**

O consumo de nutrientes observado em processos anaeróbios é, em geral, menor do que em processos aeróbios. Para se obter sucesso na operação do sistema de digestão anaeróbia, devem ser supridas as quantidades de nutrientes inorgânicos necessárias para o desenvolvimento dos microrganismos (SANT'ANNA et al., 2010).

As demandas nutricionais das bactérias envolvidas no processo de digestão anaeróbia são estabelecidas pela composição química das células microbianas. Como a composição exata geralmente é desconhecida, os requisitos de nutrientes podem ser determinados através de um método empírico. Considera-se que as células vivas são formadas por conjuntos de substâncias similares com o mesmo arranjo químico, requerendo os mesmos elementos nas mesmas proporções (CHERNICHARO et al., 1997).

Os microrganismos são compostos por elementos químicos como: carbono, nitrogênio, oxigênio, hidrogênio, fósforo e enxofre. Porém alguns nutrientes são necessários para que ocorra a biossíntese dos componentes celulares (CHERNICHARO et al., 1997).

De acordo com Chernicharo et al. (1997), a relação considerada ideal para processos de tratamento de efluentes, via anaeróbia, assumindo que tais nutrientes estejam sob uma forma disponível, é dada pela equação:

$$\text{DQO:N:P} = 350:7:1$$

Em que:

DQO = Demanda Química de Oxigênio, que representa a fração de Carbono (C).

N = Nitrogênio.

P = Fósforo.

#### **2.8.5.5 Toxicidade**

O ambiente em que ocorre o processo de degradação biológica é considerado um fator muito importante para o seu funcionamento. Sendo assim, é fundamental que seja mantida uma condição ambiental favorável para os microrganismos (CHERNICHARO et al., 1997).

Conforme Sant'Anna et al. (2010), os sulfetos pelas bactérias sulfatorredutoras (BSR) são tóxicos para os microrganismos metanogênicos. Os níveis inibitórios dos sulfetos situam-se na faixa de 100 a 800 mg/L de  $\text{S}^{2-}$ /L.

A toxicidade causada por sais está geralmente associada ao cátion do sal. Se a concentração de algum cátion se mostrar inibidora, é possível reduzi-la, adicionando íons antagonistas. É comum a utilização de sais de cloreto para adição de elementos antagonistas (CHERNICHARO et al., 1997).

O nitrogênio amoniacal pode estar presente no sistema de digestão anaeróbia sob a forma de íon  $\text{NH}_4^+$  mais tóxica, ou livre  $\text{NH}_3$  menos tóxica. A presença de amônia no sistema em elevadas concentrações inibe o crescimento dos microrganismos metanogênicos (SANT'ANNA et al, 2010).

Outros compostos inorgânicos como cromo, cromatos, níquel, zinco, cobre, arsênio e cianeto, mesmo em baixas concentrações, também são considerados altamente tóxicos ao sistema de digestão anaeróbia (CHERNICHARO et al., 1997).

#### **2.8.5.6 Tempo de detenção hidráulica**

O tempo de detenção hidráulica (TDH) é o tempo de permanência do substrato no reator. Seu valor pode variar entre algumas horas a vários dias, dependendo do tipo de digestor, do substrato aplicado, e outros fatores (LORA & VENTURINI et al., 2012). Conforme Jordão et al. (2014), o conhecimento do TDH é fundamental para dimensionar o volume do reator além de ser importante para a operação.

De acordo com Carrilho et al. (2012), TDHs menores reduzem a produção de biogás e a eficiência de remoção de matéria orgânica, mas requerem unidades digestoras de menores dimensões. O TDH varia de acordo com o tipo de resíduo, condições da reação e o tipo de utilização para o digerido (OSTREM et al., 2004).

#### **2.8.5.7 Impermeabilidade ao oxigênio**

Conforme Lora & Venturini et al. (2012), o processo de digestão anaeróbia não exige em nenhuma etapa a presença de oxigênio. Além disso, conforme os mesmos autores, os microrganismos responsáveis pela digestão anaeróbia apresentam elevada sensibilidade a presença deste gás, que inibe a produção de biogás.

A vedação do biodigestor é muito importante, pois a degradação da matéria orgânica na presença de oxigênio produz  $\text{CO}_2$  e na ausência produz  $\text{CH}_4$  (LORA & VENTURINI et al., 2012).

#### **2.8.5.8 Retenção de biomassa**

As células microbianas existentes no sistema de digestão anaeróbia podem ter ampla faixa de tamanhos, fases de crescimento, individuais ou agregadas em microestruturas. A forma da biomassa afeta a sobrevivência do organismo e a

transferência de nutrientes, podendo prejudicar a eficiência do processo (CHERNICHARO et al., 1997).

#### **2.8.5.9 Substratos utilizados para digestão anaeróbia**

O tipo de substrato escolhido para ser utilizado em processo digestão anaeróbia possui influência na estabilidade e eficiência do processo. A composição do substrato é importante tanto para quantificação e qualidade do biogás, como para a manutenção dos microrganismos. A escolha do material adequado resulta na maximização da produção de energia, a partir da obtenção de elevados teores de  $\text{CH}_4$  no biogás. Além disso, o substrato também deve conter os nutrientes necessários para a atividade e reprodução dos organismos anaeróbios (KARLSSON et al., 2014).

Segundo Karlsson et al. (2014), diferentes tipos de materiais orgânicos podem ser utilizados para a produção de biogás. Dentre eles se destacam lodo de estações de tratamento, resíduos de frigoríficos, de indústrias como alimentícia, laticínios, farmacêutica, resíduos do setor agrícola e dejetos. Segundo Kapdan & Kargi (2006), os substratos mais favoráveis para o processo de digestão anaeróbia são glicose, sacarose e lactose. Konrad, et al. (2010) citam o glicerol, rejeito proveniente do processo de produção de biocombustíveis, como um resíduo com grande potencial para geração de biogás. O mesmo contém elevada carga de carbono de fácil degradação, sendo ideal para os microrganismos do processo de digestão anaeróbia.

Os carboidratos referem-se a vários tipos de açúcares, que podem ser simples como glucose, dissacarídeos como na cana-de-açúcar, ou polissacarídeos como a celulose, o amido e o glicogênio. As características de degradação dos carboidratos são distintas no processo de digestão anaeróbia e dependem do tamanho de sua cadeia química. Substratos que contém altas concentrações de carboidratos são degradados de forma muito rápida durante a hidrólise, formando ácidos graxos. Muitas vezes, as bactérias formadoras de metano e consumidoras de ácidos graxos não são aptas para degradar ácidos graxos na mesma proporção em que os mesmos são formados, resultando em instabilidade no processo de degradação anaeróbia (KARLSSON et al., 2014).

Cataneo (2015) realizou testes com sacarose e glicerol como substrato aplicando nas concentrações de 3, 6 e 9% do volume do reator de 1 litro, obtendo resultados satisfatórios sacarose na concentração de 3%.

### 3 METODOLOGIA

Os experimentos foram realizados no período de 10/03/17 a 01/08/17, totalizando 144 dias e desses, 10 dias foram destinados aos testes preliminares, e o restante para o experimento oficial. A proposta do presente trabalho foi avaliar de forma quantitativa e qualitativa o volume de biogás produzido, bem como a concentração do gás metano. Na sequência, está descrito com maior detalhamento os materiais e métodos utilizados para a realização dos experimentos.

#### 3.1 Substratos utilizados e origem

Para a realização deste trabalho, foram utilizados como substrato os resíduos orgânicos provenientes do processo de produtivo de doces. O resíduo foi doado por uma empresa do ramo alimentício, localizada em Lajeado, Rio Grande do Sul. A planta industrial da empresa conta com produção mensal que pode chegar a 2 milhões de quilogramas. O portfólio da empresa é bem abrangente, produzindo balas de goma, chicles, pastilhas, balas de gelatina e *marshmallows*.

A empresa gera atualmente cerca de 25 toneladas/mês de resíduos orgânicos provenientes do processo produtivo, que é em parte destinado para compostagem e parte para alimentação animal, gerando custos elevados para a empresa. Tratando-se de valores, a disposição dos resíduos orgânicos da indústria representa 85% do total gasto com resíduos. Dessa forma, o tratamento biológico se mostra como forte



alternativa de baixo custo para a disposição desses resíduos, bem como o aproveitamento do seu potencial energético.

Os substratos selecionados para a realização dos experimentos foram os resíduos orgânicos de processo gerados nos setores da produção de balas goma, *marshmallows* e chicles recheados, ilustrados respectivamente pelas Figuras 8, 9 e 10.

Figura 8 - Balas de goma



Fonte: O autor.

Figura 9 - *Marshmallows*



Fonte: O autor

Figura 10 - Chicle recheado



Fonte: O autor.

Esses resíduos foram escolhidos devido ao seu grande volume de produção. Em consequência, os mesmos geram maior quantidade de perdas de produto acabado e matéria-prima no decorrer do seu processo de fabricação. Outro fator de grande relevância para a escolha dos substratos foi a sua composição, que apresenta como principais componentes açúcares e amido, substâncias que, segundo Karlsson (2014), apresentam fácil e rápida biodegradabilidade através da digestão anaeróbia. É caracterizado como perda todo produto que cai no chão ou não atinge o padrão de qualidade mínimo exigido. Dessa forma, surgiu a oportunidade de realizar testes para avaliação do potencial energético desses resíduos.

A caracterização prévia dos substratos foi determinada pela concentração de matéria orgânica, através da realização de ensaios de DQO. A forma sólida dos substratos tornou dificultosa a realização desses ensaios. Para a realização dos mesmos foi necessário submeter uma alíquota dos produtos em aquecimento para que atingissem a forma líquida, possibilitando a realização dos ensaios de DQO.

### 3.2 Inoculo

Como inoculo, foi utilizado o lodo anaeróbio proveniente da ETE da própria empresa. O lodo foi coletado diretamente do reator anaeróbio de fluxo ascendente (UASB) existente. Foi optado por utilizar como inoculo o lodo da ETE da empresa pelo mesmo já estar aclimatado com os compostos a serem digeridos.

Algumas análises de caracterização inicial do inoculo foram realizadas, a fim de possibilitar a comparação do inoculo inicial com o lodo digerido ao final dos experimentos. Para isso, foram realizados ensaios de DQO e Sólidos Voláteis Totais (SVT) para determinar a concentração de matéria orgânica e biomassa do inoculo, respectivamente. A sua forma granular dificultou a realização do ensaio de DQO, mas, esse obstáculo foi superado através da quebra e esmagamento dos grânulos com auxílio de um almofariz, que é uma espécie de pilão.

### 3.3 Testes preliminares

Foram realizados 2 testes preliminares com a finalidade de ajustar a dosagem adequada de produto a ser testado no sistema de digestão anaeróbia. No primeiro teste foi adotada a dosagem de 5 unidades de produto por reator aplicando carga orgânica de 27,9 g/semana para os reatores em que foi testada a bala de goma, 15,6 g/semana para os em que foi testado o chicle e 12,6 g/semana para os reatores em que foi testado o *marshmallow*.

No segundo teste a dosagem de produto foi reduzida para 3 unidades por reator, aplicando carga orgânica de 16,7 g/semana para os reatores em que foi testada a bala de goma, 9,4 g/semana para os em que foi testado o chicle e 7,5 g/semana para os reatores em que foi testado o *marshmallow*.

Para a realização dos testes preliminares foi necessária a utilização da estrutura do laboratório de biorreatores, localizado no prédio 11, da Universidade do Vale do Taquari - UNIVATES. O material utilizado consiste em reatores de vidro com

volume total de 1L e útil de 600mL, incubadora, sistema de medição de biogás, pHmetro de bancada, copos Becker e provetas.

Os testes preliminares foram realizados em triplicata para cada produto. A metodologia utilizada para os testes consistiu na dosagem predefinida do substrato nos reatores e adição de 600mL de inóculo. A título de comparação, em cada teste preliminar foi avolumado um reator com 600mL de inóculo para servir como controle.

Após o preenchimento dos reatores com os respectivos substratos e inóculo, foi realizada medição de pH dos mesmos que foram acoplados ao sistema de medição de biogás e acondicionados em incubadora adaptada a uma temperatura de 35°C, onde permaneceram por 15 dias corridos. Ao final dos 15 dias, os reatores foram desacoplados do sistema de medição de biogás e retirados da incubadora para medição do pH.

### **3.4 Materiais utilizados**

Para a realização dos experimentos, foi utilizada a estrutura do laboratório de Biorreatores da Universidade do Vale do Taquari - UNIVATES, localizado no prédio 11 do campus de Lajeado.

### **3.5 Reatores operados em batelada alimentada e acondicionados em incubadora adaptada**

Para a realização do experimento, foram utilizados 10 reatores de vidro com volume total de 1L e útil de 600 mL. Dos 10 reatores, 3 foram utilizados para avaliação do potencial de geração de biogás do substrato *marshmallow*, 3 para utilização do substrato goma, 3 para o substrato chicle recheado, e 1, denominado branco, foi utilizado para a amostra controle. Os reatores utilizados estão ilustrados na Figura 11.

Figura 11 - Reatores de vidro



Fonte: o autor

No momento inicial dos experimentos, os reatores foram alimentados com uma unidade do substrato escolhido e foi adicionado o volume de 600 mL de inoculo. A carga orgânica aplicada foi de 5,58 g/semana para os reatores em que foi testada a bala de goma, 2,52 g/semana para os em que foi testado o chicle e 3,12 g/semana para os reatores em que foi testado o *marshmallow*. Após o preenchimento de todos os reatores com seus respectivos substratos foi realizada a medição do pH dos mesmos.

Depois da medição do pH, os reatores foram acondicionados em incubadora adaptada, mantidos a temperatura constante de 35°C e conectados aos medidores de volume de biogás automáticos através de mangueiras de silicone, conforme ilustram as Figuras 12, 13 e 14.



Figura 12 - Reatores conectados as mangueiras de silicone da incubadora



Fonte: O autor

Figura 13 - Mangueiras de silicone ligadas aos tubos em formato de U (Sistema de medição de biogás)



Fonte: O autor

Figura 14 - Incubadora



Fonte: O autor

Para facilitar o início da operação e acompanhamento dos experimentos, foi optado pela alimentação periódica semanal com dosagem de uma unidade do substrato por reator. No caso do chicle, devido a base da goma de mascar não ser digerida totalmente pelo sistema, a alimentação foi interrompida no dia 19 e retomada no dia 26 para verificar a degradação desse ingrediente. O mesmo fato ocorreu no dia 44 retomando a alimentação no dia 50. A Tabela 2 mostra o volume correspondente para cada unidade de produto, conforme dados cedidos pela empresa.

Tabela 2 - Volume correspondente a 1 unidade de produto

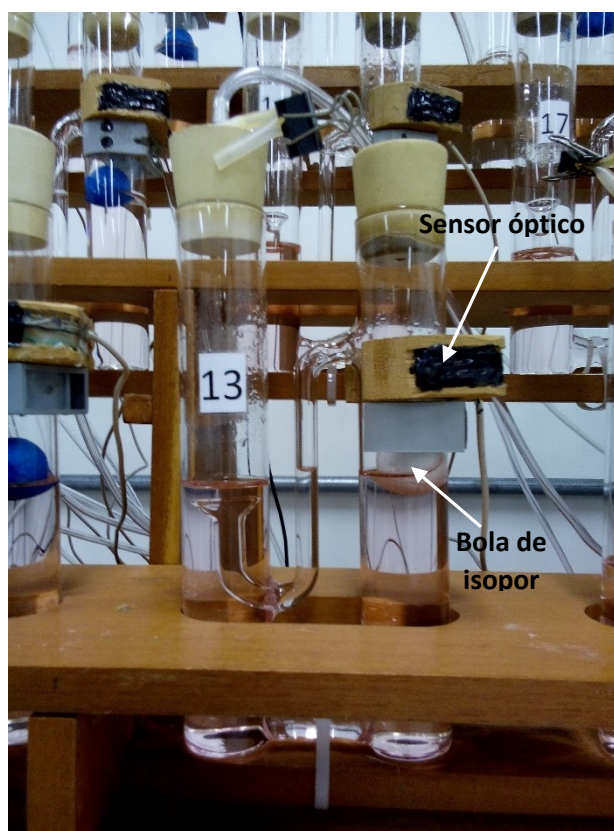
<b>Produto</b>	<b>Volume (mL)</b>	<b>Peso aprox. (g)</b>
Bala de goma	3,0	3,5
Chicle	3,0	5,5
Marshmallow	5,0	5,0

A faixa de temperatura mesofílica foi escolhida para a operação, por ser a que apresenta melhor desenvolvimento dos microrganismos metanogênicos e estabilidade do processo de digestão anaeróbia (KONRAD et al., 2010).

### 3.6 Quantificação do biogás

A quantificação do biogás gerado no experimento foi realizada com o auxílio de um sistema de medição automatizado que consiste em um tubo de vidro com formato de U, um sensor óptico ligado a um controlador, uma esfera de isopor, e um circuito eletrônico com memória de armazenamento, conforme ilustram as Figuras 15 e 16 (MINHO et al., 2012).

Figura 15 - Tubo em formato de U



Fonte: O Autor



Figura 16 - Controlador com circuito eletrônico



Fonte: O autor.

O dispositivo utilizado para a medição do biogás funciona baseado no princípio do deslocamento de fluídos. O reator está ligado em uma das pontas do tubo e à medida que o gás se acumula no tubo passa a deslocar o fluído contido no tubo, elevando seu nível no lado oposto, onde está instalado o sensor óptico que registra a movimentação do fluído, envia um sinal para o circuito eletrônico que o converte em informação e armazena na memória (MINHO et al., 2012)

O volume de biogás gerado pelo experimento é evidenciado pela lei combinada dos gases ideais, que expressa de forma matemática, através de uma equação, a relação entre temperatura, pressão e volume de um gás como constante (HALLIDAY, RESNICK e WALKER, 2009).

Os dados armazenados na memória do dispositivo foram baixados em planilhas eletrônicas para o computador através de um *software* específico para o medidor.

### 3.7 Métodos de análise e monitoramento dos experimentos

As análises de monitoramento de pH, da concentração de  $\text{CH}_4$ , bem como o *download* dos dados de volume de biogás gerado ocorreram com periodicidade semanal de forma conjunta com a alimentação dos reatores para facilitar o monitoramento do experimento. A determinação do pH, SVT e DQO do inoculo

ocorreu no início do experimento para o inóculo e no final do experimento para avaliação do lodo digerido.

Ao final do experimento foram realizadas análises para determinação de nitrogênio e fósforo do lodo digerido para avaliação da qualidade do biofertilizante a possibilidade de sua incorporação em solo agrícola.

### **3.7.1 Tempo de detenção hidráulico**

Unidades com funcionamento em regime mesofílico possuem TDH (10-40 dias). A digestão por *via seca* (teores de sólidos acima 30%) apresenta TDH de (14 a 30) (OSTREM et al., 2004).

O tempo de detenção hidráulico selecionado para a realização dos experimentos foi de 134 dias, porém foram considerados 104 dias para a compilação dos resultados de volume de biogás e concentração de metano devido à problemas no sistema de registro do volume de biogás em alguns reatores. Com periodicidade semanal os reatores foram abertos para adição do substrato. Foi selecionado tempo de detenção hidráulico maior do que o indicado pela literatura para poder avaliar a estabilidade do sistema de digestão anaeróbia quando alimentado durante maior período de tempo com os substratos testados.

### **3.7.2 Qualificação do biogás**

Para a avaliação qualitativa do biogás foi utilizado, para a determinação do percentual de CH<sub>4</sub>, um sensor específico denominado *Advanced Gasmitter*, produzido pela empresa alemã PRONOVA® Analysentechnik GmbH & Co, mostrado pela Figura 17. O método de medição consiste em injetar o biogás no aparelho através de uma seringa simples. O aparelho realiza a leitura do percentual de CH<sub>4</sub> contido na amostra injetada e mostra no visor a leitura do máximo percentual obtido para a amostra aplicada.

As medições de metano ocorreram com periodicidade semanal, nos mesmos dias em que foram realizadas as alimentações e medições de pH. Os valores obtidos de teor de metano nas medições foram extrapolados para o restante dos dias até a realização da próxima medição.

Figura 17 - Equipamento para qualificação do metano



Fonte: O autor.

### 3.7.3 Medição do pH

Para determinar o pH dos reatores foi utilizado o equipamento pHmetro PH-2000 da marca *Instrutherm*, ilustrado pela Figura 18, que mede o pH pelo Método Potenciométrico 4500B. A análise consistiu na inserção dos eletrodos de pH e temperatura na amostra e, após alguns instantes, o valor mostrado no visor do aparelho estabiliza, indicando o valor de pH da amostra.

Figura 18 - Phmetro utilizado no experimento



Fonte: O autor

#### 3.7.4 Determinação de sólidos voláteis totais (SVT)

Para a determinação de sólidos foi utilizado o Método Gravimétrico 2540B (APHA, 2005). O primeiro passo consistiu em identificar e submeter a cápsula de porcelana a 550°C durante 60 min em forno mufla. Passado esse tempo, a cápsula foi retirada do forno e levada a um dessecador, com sílica gel, permanecendo até alcançar a temperatura ambiente para que não ficasse exposta a umidade.

A próxima etapa consistiu na pesagem da cápsula em balança analítica. Após obtido o peso da cápsula vazia, colocou-se na cápsula uma amostra com volume 25mL. A cápsula contendo a amostra foi pesada novamente e encaminhada a estufa, sendo submetida a uma temperatura de 105°C durante um período de 24 horas. Passado esse período, a cápsula contendo a amostra foi encaminhada mais uma vez ao dessecador, permanecendo até atingir a temperatura ambiente. Após, a cápsula passou por pesagem. Os sólidos totais foram medidos através da volatilização de um determinado volume da amostra.

Após a pesagem, a cápsula foi submetida outra vez a uma temperatura de 550°C durante 4 horas no forno mufla. Passado esse período, a cápsula foi retirada e

colocada no dessecador para atingir a temperatura ambiente. Transcorrido esse tempo, a cápsula passou por pesagem novamente. Os dados das pesagens permitiram obter os valores de sólidos totais fixos e voláteis, correspondentes, respectivamente, as partes da matéria que permaneceu retida (matéria inorgânica) e volatizou da cápsula (material inorgânico).

A determinação de sólidos voláteis totais, foi realizada no início dos experimentos utilizando o uma amostra do controle e, ao final dos experimentos foi feita a análise do controle e do líquido reacional das triplicatas para comparação.

A análise de SVT não foi realizada para as misturas (inoculo + substrato) no início dos experimentos devido ao substrato estar na forma sólida impossibilitando a coleta de uma amostra homogênea da mistura. Dessa forma foi considerado, para todas amostras, os resultados de SVT obtidos para o controle no início dos experimentos.

### **3.7.5 Determinação de demanda química de oxigênio (DQO)**

A determinação da DQO foi realizada por método de determinação fotométrica da concentração de cromo (III) utilizando-se de *kits* de teste rápido modelo NANOCOLOR CSB 985012 DQO 60.000 5-60g O<sub>2</sub>/L, produzidos pela empresa alemã MACHEREY NAGEL (MN), ilustrados pela Figura 19. O teste é baseado no método aprovado internacionalmente (DIN 38 409 – H41 – 1).

Figura 19 - Caixa de *kits* NANOCOLOR para teste rápido de DQO



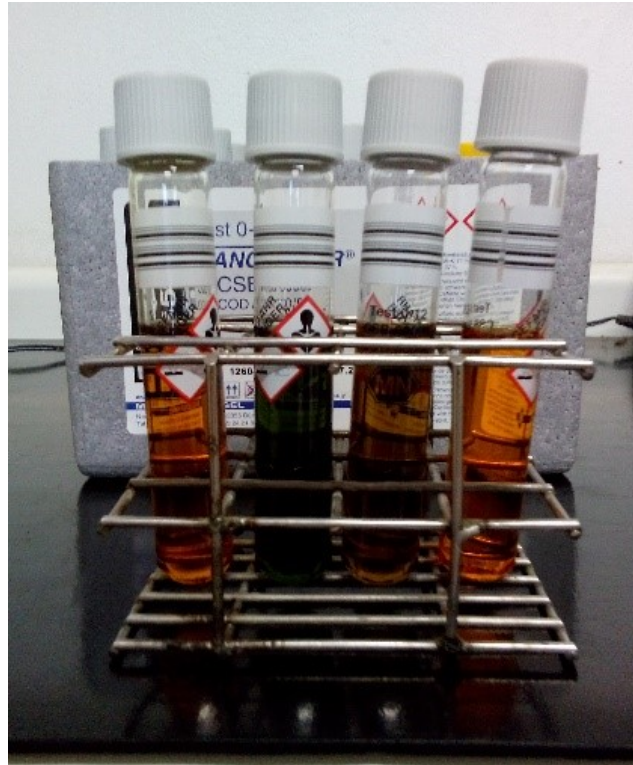
Fonte: O autor

O tubo teste, ilustrado pela Figura 20, já contém dosados os reagentes ácido sulfúrico, dicromato de potássio e sulfato de mercúrio. O procedimento para determinação da DQO consistiu em dosar, com auxílio de micropipetador, 200µL da amostra a ser analisada no tubo de teste, conforme ilustrado pela Figura 21.

Após a dosagem, o tubo foi fechado e agitado para homogeneização da amostra e dos reagentes. Na sequência, o tubo foi levado ao digestor pré-aquecido, sendo submetido a temperatura de 148°C durante 2 horas. Para a digestão da amostra foi utilizado o bloco de aquecimento com capacidade para 12 tubos. Após o término da digestão, o tubo foi retirado do digestor, agitado novamente e permaneceu em um *rack* até atingir a temperatura ambiente. Após atingida a temperatura ambiente, o teste estava pronto para ser medido. Com auxílio de papel macio levemente umedecido, o tubo foi limpo para a realização da medição no fotômetro, utilizando comprimento de onda de 620nm. Para medição do tubo teste foi utilizado o equipamento fotômetro multiparâmetros portátil modelo PF-12 PLUS (representado pela Figura 23).



Figura 20 - Tubos de ensaio do teste rápido de DQO



Fonte: O autor

Figura 21 - Instrumentos utilizados para realização do procedimento



Fonte: O autor.

Figura 22 - Bloco de aquecimento para digestão MN  
*Nanocolor Vario C2*



Fonte: O autor

Figura 23 - Fotômetro multiparâmetros MN PF-12 PLUS



Fonte: O autor



### 3.7.6 Determinação de nitrogênio total Kjeldahl (NTK)

A determinação de NTK foi realizada utilizando o método macro-Kjeldahl que consiste na transferência de uma alíquota da amostra para um frasco Kjeldahl e após, adição de 50 mL do reagente para digestão. Na sequência, o frasco foi acoplado no digestor conectado ao lavador de gases.

Com o frasco acoplado e o digestor ligado, a amostra foi submetida a uma rampa de temperatura entre 130-150°C, para atingir o volume de 30 mL. Após, a temperatura foi elevada até 350°C, para a total digestão da amostra, que apresentou coloração esverdeada e, sem presença de pontos escuros até o aparecimento de fumos brancos na parte superior do frasco.

O frasco permaneceu em um *rack* até atingir a temperatura ambiente e, após isso, foram adicionados 50 mL de água destilada, 50 mL de solução de hidróxido de sódio (NaOH)/ tiosulfato de sódio. O frasco foi acoplado ao equipamento de destilação. Foi introduzido no equipamento um erlenmeyer de 250 mL contendo 50 mL da solução absorvente de ácido bórico para coletar o condensado da amostra pré-digerida.

Durante a destilação, foram coletados cerca de 200 mL do destilado para posterior titulação com solução de ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) 0,02N, até a amostra atingir o ponto de viragem. Foi utilizado como referência o ponto de viragem do branco. O valor de ácido sulfúrico titulado foi anotado para utilizar no cálculo (APHA, 2005).

Cálculo:

$$mgN - \frac{NTK}{L} = \frac{V_{H_2SO_4} \times 280(\text{fator do } H_2SO_4 \text{ } 0,02N)}{Vol. \text{ de amostra}}$$

### 3.7.7 Determinação de fósforo total

A determinação de fósforo total foi realizada pelo método de espectrometria com ácido ascórbico, que consistiu em inserir 50 mL da amostra em um becker e adicionar 0,5g de persulfato de potássio e 1 mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. A amostra foi aquecida em chapa aquecedora evitando a fervura até atingir o volume de 10 mL.

Adicionou-se na amostra respectivamente, 20 mL de água destilada, 1 gota de fenolftaleína e após foi adicionado solução de NaOH 6N até a amostra atingir a coloração rosa. Na sequência foi adicionado solução de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,1N até a coloração rosada desaparecer (o pH próximo a 7,0 foi conferido com pHmetro). Transferiu-se as amostras para balões volumétricos de 100mL fazendo lavagens com água destilada no becker para garantia da análise de toda amostra. Os balões foram avolumados e as amostras foram homogeneizadas.

Após foram transferidos 50 mL da amostra para um becker de 100mL, e pipetados 8 mL do reagente combinado e aguardados 10 minutos para reação. A leitura da amostra foi realizada no espectrofotômetro utilizando o comprimento de onda de 880 nm.

A preparação da curva padrão consistiu em utilizar os mesmos passos seguidos para digestão e preparação da amostra final, porém utilizando no lugar das amostras uma solução padrão de fósforo em diferentes concentrações. As amostras para curva padrão foram preparadas com antecedência de no máximo 2 horas.

Os valores obtidos no espectrofotômetro foram utilizados para plotar um gráfico das absorbâncias lidas em função das concentrações dos padrões. Deve ser obtida a equação da reta notando que o coeficiente de correlação (R<sup>2</sup>) deve ser superior a 98% (APHA, 2005).

Cálculo:

$$\frac{mg}{L} PO_4 = \text{leitura do gráfico} \times 2$$

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Testes preliminares

Foram realizados inicialmente 2 testes preliminares que objetivaram o ajuste da dosagem de substrato nos reatores. No primeiro teste foi utilizada a dosagem de 5 unidades de produto por reator e, no segundo, foram dosadas 3 unidades de produto por reator. Ambos os testes consistiram na introdução do substrato nas quantidades descritas na metodologia, medição de pH e acondicionamento dos reatores na incubadora. Na Tabela 3 está representada a carga orgânica aplicada nos reatores.

Tabela 3 - Carga orgânica aplicada no primeiro teste preliminar

	<b>DQO (gO<sub>2</sub>/L)</b>	<b>Volume aproximado 5 un (mL)</b>	<b>Carga Orgânica Aplicada (g/semana)</b>
<b>Bala de Goma</b>	1.860	15	27,9
<b>Chicle</b>	1.040	15	15,6
<b><i>Marshmallow</i></b>	503	25	12,6

As misturas iniciais (inoculo + substrato) do primeiro teste preliminar apresentaram resultados de pH similares ao do inoculo, variando entre 6,84 e 6,92. Logo no dia 3 após o início, foi percebida, em todos os reatores com exceção do controle, redução drástica de pH, inibição da produção de biogás e alteração na coloração do lodo, indicando o colapso do sistema de digestão anaeróbia.

O pH da mistura nos reatores do primeiro teste preliminar variou de 3,47 a 3,53. O pH do controle para este teste sofreu leve elevação para de 6,92 para 7,02, indicando que foi aplicada carga orgânica em excesso nos reatores que receberam substrato. No terceiro dia após o início os reatores não apresentavam eventos de produção de biogás e a concentração de metano medida foi abaixo de 5%. Obteve-se o valor de 54,28% de metano para o reator controle.

Os resultados obtidos no primeiro teste preliminar indicaram que o sistema de digestão anaeróbia não foi capaz de assimilar a carga orgânica aplicada tornando necessária a redução da mesma.

No segundo teste preliminar foram dosadas 3 unidades de produto, seguindo os passos descritos na metodologia. Na Tabela 4 seguem representados os dados de carga orgânica aplicada nos reatores. Para este teste, a mistura inicial (substrato + inoculo) apresentou valores de pH que variaram de 6,89 a 7,01.

Tabela 4 - Carga orgânica aplicada no segundo teste preliminar

	<b>DQO (gO<sub>2</sub>/L)</b>	<b>Volume aproximado 3 un (mL)</b>	<b>Carga Orgânica (g/semana)</b>
<b>Bala de Goma</b>	1.860	9	16,7
<b>Chicle</b>	1.040	9	9,4
<b><i>Marshmallow</i></b>	503	15	7,5

Passados 5 dias do início do teste, foi constatado que todos os reatores, exceto o controle, colapsaram. As características observadas foram as mesmas do teste anterior, redução drástica do pH, inibição da produção de biogás e alteração na coloração do inoculo.

O pH da mistura contida nos reatores colapsados variou entre 4,38 e 4,63. Não foram registrados eventos de produção de biogás para esses reatores e a concentração de metano medida foi abaixo de 20%. O reator controle manteve o pH em 6,94, registrou alguns eventos com a concentração de 58,5% de metano.

O colapso do sistema de digestão anaeróbia evidenciado nos 2 testes preliminares está associado ao excesso de matéria orgânica aplicada nos reatores. Segundo Fernandes (2017), substratos com elevada concentração de matéria orgânica podem causar sobrecarga orgânica no reator e desencadear a instabilidade devido a taxa de remoção de ácidos voláteis removidos na etapa da metanogênese ser menor do que a taxa de produção desses produtos na acidogênese. A principal consequência dessa instabilidade é a redução do pH que reduz a atividade metanogênica.

Backes (2011) registrou queda de pH após a adição de glicerina em seus experimentos, obtendo valores de 5,6. A autora explica que esse decréscimo ocorreu pelo aumento na produção de ácidos graxos voláteis e complementa que, para o desenvolvimento da metanogênese, é necessário que o pH esteja próximo a faixa neutra de 6,8 a 8,0 e que as bactérias metanogênicas podem estar sendo inibidas caso a taxa de remoção de ácidos graxos voláteis (AGV) não acompanhar a taxa de produção dos mesmos.

A redução da geração de metano logo após a adição de glicerina possui relação direta com a concentração de ácido propiônico, ácido este que causa inibição dos microrganismos metanogênicos (WANG et al. 2009). Os microrganismos responsáveis pela metanogênese apresentam alta sensibilidade a choques de processo causados por excesso de carga orgânica ou hidráulica (LÓPES, 2009). Para Aquino, Chernicharo (2005), o desequilíbrio dos microrganismos é resultado do acúmulo de ácidos graxos voláteis.

## **4.2 Início do experimento**

O tratamento de resíduos orgânicos através da digestão anaeróbia, segundo Oliveira (2009), é uma alternativa viável que proporciona o aproveitamento do biogás que pode ser utilizado como fonte de energia e do biofertilizante que pode ser utilizado como adubo orgânico.

O início deste experimento consistiu na inserção da quantidade pré-estabelecida de inoculo e substrato nos reatores. Após a inserção do inoculo e substrato nos reatores, foi realizada a medição de pH e, os mesmos foram colocados na incubadora conforme descrito na metodologia. Foi inserido apenas inoculo em um reator para utilização do mesmo como controle, e foi intitulado de branco.

Conforme dados fornecidos pela indústria uma unidade dos substratos de bala de goma, *marshmallow* e chicle possuem, respectivamente, o volume aproximado de 3mL, 5mL e 3mL. Esses dados foram utilizados para o cálculo da carga orgânica semanal aplicada nos reatores. Na Tabela 5 é apresentada a relação volume versus DQO aplicada para cálculo da carga orgânica de cada substrato testado.

Tabela 5 - Carga orgânica dos substratos.

	Volume aproximado de 1 un (mL)	DQO (gO <sub>2</sub> /L)	Carga Orgânica (g/semana)
<b>Bala de Goma</b>	3	1.860,0	5,58
<b><i>Marshmallow</i></b>	5	503,0	2,52
<b>Chiclé Recheado</b>	3	1.040,0	3,12

A alimentação dos reatores com a quantidade de substrato equivalente a uma unidade de bala foi baseada em resultados obtidos nos 2 testes preliminares descritos anteriormente.

A produção efetiva de biogás e a sua qualidade estão diretamente relacionadas a concentração de carga orgânica aplicada no reator (ROBRA, 2006). Utilizando glicerina residual bruta como suplemento para digerir dejetos suínos e bovinos, Backes (2011) afirma que a adição de glicerina provoca elevação da carga orgânica no sistema e, em consequência, aumento na produção de biogás.

### 4.3 Geração de biogás x produção de metano

Abaixo estão relacionados os dados obtidos nos experimentos de cada condição proposta na metodologia, bem como o comparativo dos dados de todos os substratos utilizados. Para melhor apresentação, foram elaborados 2 Gráficos: um relacionado a geração de biogás e outro à quantidade de metano contida no biogás. As datas de alimentação podem ser identificadas através das linhas amarelas que indicam os dias exatos em que foram realizadas as alimentações.

Gráfico 1 - Produção de biogás

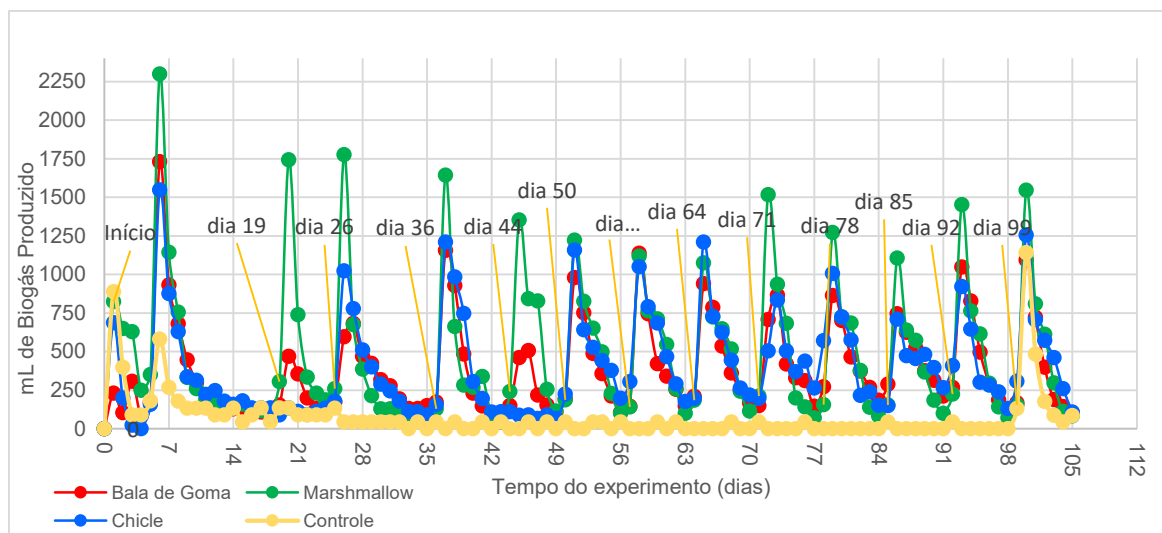
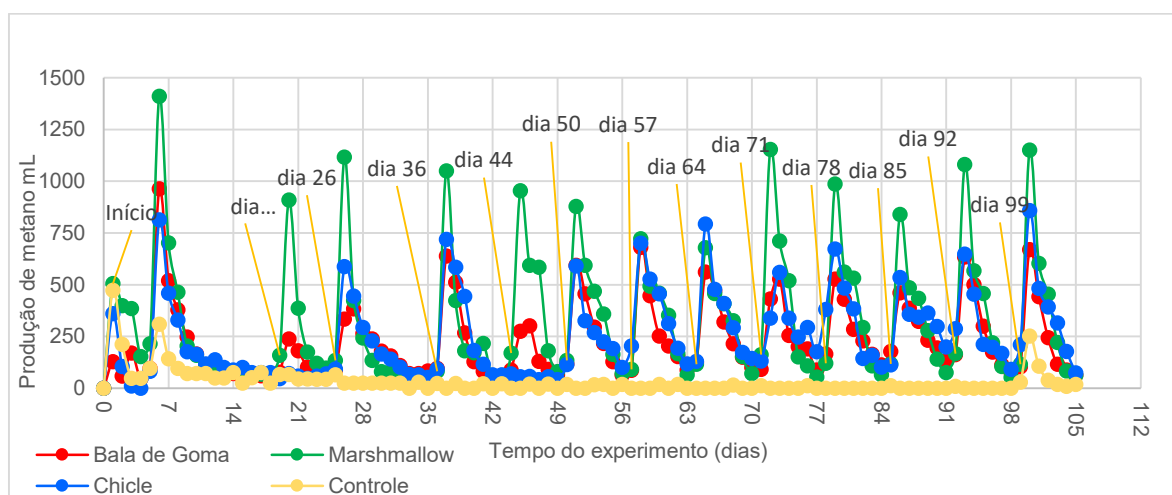


Gráfico 2 - Produção de metano



O tempo de duração total dos experimentos foi de 134 dias, porém no dia 104 o equipamento de medição do volume de biogás gerado apresentou erros no registro dos dados de vários reatores. Todos os registros posteriores a esse dia foram desprezados para garantir a qualidade dos dados apresentados. Considerando as triplicatas, foram dosados nos reatores, durante todo o período do experimento, os valores de massa de 59,986g de bala de goma, 82,309g de chicle, 83,434g de *marshmallow*.

Para testes com reatores de bancada, o tempo de detenção hidráulica usual adotado pelos autores Konrad (2010), Minho (2012), Heberle (2013) e Cataneo (2015) foi de 15 dias. Foi adotado o tempo de detenção hidráulica de 134 dias na realização deste trabalho para poderem ser avaliados o desempenho e a capacidade de digestão do inoculo quando submetido a tempos de detenção hidráulica maiores com sucessivas alimentações.

Os principais ingredientes dos substratos testados são açúcares e amidos, considerados de fácil assimilação pelo sistema de digestão anaeróbia por suas cadeias moleculares serem facilmente quebradas pelos microrganismos. Pode ser observado no Gráfico 1 de produção de biogás que, logo após as alimentações, o sistema de digestão anaeróbia apresenta elevação repentina na geração de biogás representados pelos picos e, logo em seguida, decaimento. Os picos de produção de biogás indicam a rápida conversão da matéria orgânica em biogás pelo sistema de digestão anaeróbia.

Na Tabela 6 abaixo estão apresentados os valores totais de biogás e metano gerado para cada substrato testado ao final dos experimentos.

Tabela 6 - Volumes totais de biogás e metano

	<b>Volume de Biogás (mL)</b>	<b>Volume de Metano (mL)</b>
<b>Bala de Goma</b>	40.635,2	23.862,7
<b>Chicle</b>	42.227,7	26.408,9
<b><i>Marshmallow</i></b>	51.429,4	34.733,9
<b>Controle</b>	7.717,8	3.346,8



A maior produção de biogás registrada ocorreu no dia 6, alcançado pelo substrato *marshmallow* atingindo produção de biogás de 2,3L e, desses, 1,4L de metano. Observando o Gráfico 2 fica evidenciado potencial deste substrato para a produção de metano. O *marshmallow* se sobressaiu perante aos outros substratos testados, atingindo várias vezes produção de metano acima de 1 L/dia. Mais adiante serão apresentados com maior detalhamento os resultados de cada substrato utilizado.

Ao final dos 104 dias de experimento, foram gerados 40,6 L de biogás para o substrato bala de goma, 42,2 L para o chicle e, 51,4 L para o *marshmallow*. Nas mesmas condições o controle gerou 7,7 L de biogás.

Os valores médios de concentração de metano obtidos nos reatores testados foram de 58,47%, 68,61%, 63,37% e 37,46% para os substratos bala de goma, *marshmallow*, chicle e controle, respectivamente. Os resultados obtidos para o teor de metano neste trabalho são similares aos obtidos por outros autores como Konrad (2010), Backes (2011), Minho (2012), Mafaciolli (2012) e Cataneo (2015). Estes quatro primeiros autores utilizaram glicerina como cosubstrato e Cataneo (2015) utilizou sacarose.

Os valores obtidos para produção de biogás e metano neste trabalho são próximos aos resultados obtidos por Konrad (2010), que em seus experimentos, adicionou glicerina a 3% do volume do reator como cosubstrato para lodo de ETE, obtendo após 15 dias 5,8L de biogás contendo 61% de metano.

#### **4.4 Bala de goma**

A bala de goma utilizada como substrato nos experimentos possui concentração de matéria orgânica elevada. Obteve-se o resultado de 1.860 g/L de O<sub>2</sub> nos ensaios de DQO realizados. Mesmo recebendo maior carga orgânica que os demais, os reatores em que foi testado esse substrato produziram biogás até o final dos experimentos e, não apresentaram sinais de colapso como queda de pH e inibição da produção de biogás. Apesar de sua concentração de matéria orgânica elevada,

esse substrato foi bem aceito pelo inoculo, gerando biogás até o término dos experimentos nos três reatores testados.

Durante os experimentos 1 dos 3 reatores em que foi utilizado esse substrato parou de registrar eventos no dia 65, devido a um defeito no sensor do sistema de medição de biogás. Todos os dados registrados para esse reator foram desprezados para a compilação dos resultados obtidos a fim de evitar discrepâncias entre os resultados dos reatores.

Para melhor apresentação, os resultados obtidos para o substrato bala de goma estão compilados na Tabela 7.

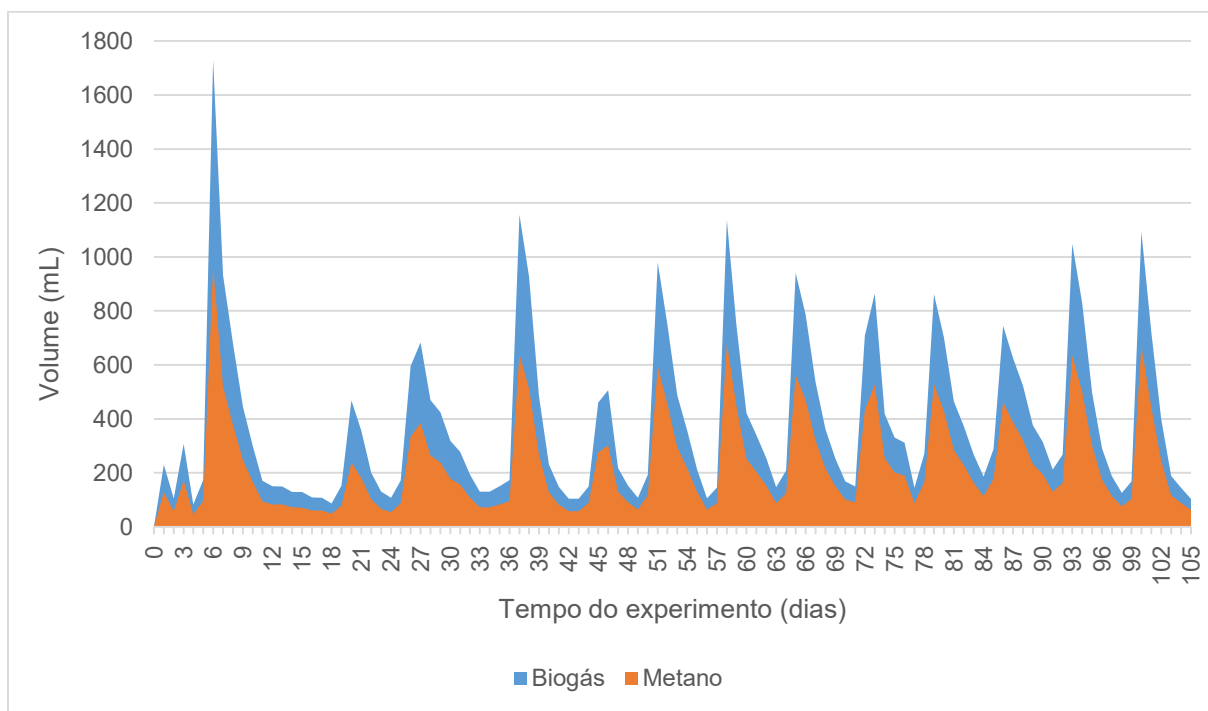
Tabela 7 - Resultados obtidos para bala de goma

	<b>Substrato Bala de Goma</b>
<b>Tempo de experimento (dias)</b>	104
<b>Volume de Biogás do Controle (mL)</b>	7.717,8 ( $\pm$ 163 mL)
<b>Volume Total de Biogás (mL)</b>	40.635,21 ( $\pm$ 307 mL)
<b>Média Diária de Biogás (mL)</b>	387
<b>Teor Médio de Metano (%)</b>	58,61
<b>Volume Total de Metano (mL)</b>	23.862,7 ( $\pm$ 181 mL)
<b>Média Diária de Metano (mL)</b>	227,26

Em relação ao controle, os reatores que foram alimentados com bala de goma apresentaram incremento de 426,51% na produção de biogás, evidenciando o grande potencial desse substrato para produção de biogás.

Para melhor visualização do volume de metano gerado, foi plotado o Gráfico 3 em que estão apresentados os volumes de biogás, na cor azul, e metano, na cor laranja, gerados pelos reatores em que foi utilizado bala de goma como substrato.

Gráfico 3 - Volumes de biogás versus metano nos reatores da bala de goma.



Observando o Gráfico 3 pode-se verificar que, decorridos 6 dias do início do experimento, foi atingido o pico máximo de produção de biogás utilizando bala de goma foi de 1.729 mL, os demais picos variam de 460 mL a 1.100 mL.

Também pode ser observado aumento na geração de biogás logo após a realização das alimentações, bem como queda na produção no primeiro ou segundo dia após a inserção do substrato. Esse fato pode ser explicado pela rapidez que os microrganismos possuem em assimilar a matéria orgânica aplicada, tendo em vista que a bala de goma é composta basicamente por açúcares e amidos que são digeridos com rapidez pelo sistema anaeróbio devido apresentarem cadeias moleculares fáceis de serem quebradas pelos microrganismos.

Nos reatores em que foi utilizado como substrato bala de goma geraram em média 383 mL/dia de biogás com teor de 58,61% de metano. Cataneo (2015), testando, em reatores de bancada, sacarose e glicerol a 3% do volume do reator obteve médias de 1.325 mL/dia de biogás com 61,9% de metano para sacarose e 594 mL/dia de biogás com 65,72% de metano para glicerol.

#### 4.5 Chicle

O chicle utilizado como substrato também apresentou resultado de DQO elevado, 1.040 g O<sub>2</sub>/L. A carga orgânica aplicada para o chicle foi de 3,12 g/semana, relativamente menor que aplicada para bala de goma. Todos os resultados obtidos para esse substrato seguem compilados na Tabela 8.

Todos os reatores em que foi testado o substrato chicle produziram biogás e mantiveram seu pH dentro da faixa de operação considerada ideal. Durante os experimentos foi detectado que um dos reatores estava registrando eventos, contudo verificou-se o volume de biogás igual a 0. Esse problema pode ter ocorrido pelo equipamento de medição de biogás não ter gravado a calibração para esse tubo. A fim de evitar a compilação de resultados tendenciosos todos os dados registrados por esse reator foram desprezados.

Tabela 8 - Resultados obtidos para chicle

	<b>Substrato Chicle</b>
<b>Tempo de experimento (dias)</b>	104
<b>Volume de Biogás do Controle (mL)</b>	7.717,8 (± 162 mL)
<b>Volume Total de Biogás (mL)</b>	42.227,66 (± 323 mL)
<b>Média Diária de Biogás (mL)</b>	402,17
<b>Teor Médio de Metano (%)</b>	63,13
<b>Volume Total de Metano (mL)</b>	26.408,94 (± 202 mL)
<b>Média Diária de Metano (mL)</b>	251,51

Foram gerados ao final dos 104 dias do experimento 42,227L de biogás, média diária de 402,17mL. A concentração de metano obtida nos experimentos em que foi utilizado o substrato chicle foi em média de 63,13% de metano.

Em relação ao controle, os reatores em que foi dosado o substrato chicle, mesmo não tendo digerido por completo a base da goma de mascar ao final dos experimentos, apresentaram incremento na produção de biogás de 547,14%.

Para melhor apresentação dos resultados de biogás e metano gerados pelos reatores em que foi testado o substrato chicle foi plotado o Gráfico 4 em que seguem apresentados em azul os dados de biogás e, em laranja os dados de metano gerados pelos reatores em que foi testado o substrato chicle.

Gráfico 4 - Volume de biogás versus metano nos reatores do chicle



Os resultados de geração de biogás e concentração de metano são levemente superiores aos obtidos para bala de goma, como pode ser observado no Gráfico 4. No dia 6 foi observado o maior pico de produção de biogás 1.549,17 mL, mas ao contrário dos outros substratos o maior pico de geração de metano ocorreu no dia 100 produzindo 859,12 mL.

No dia 19, foi verificado que os reatores contendo o substrato chicle ainda não haviam degradado a base da goma de mascar e, por isso, não foi realizada alimentação desses reatores nesse dia, com a finalidade de testar a degradação total do material. O mesmo fato ocorreu no dia 44, constatando-se que a base de goma de mascar requer mais tempo de detenção hidráulica para ser degradada.

Devido a esses testes, pode ser observado no Gráfico 4 que nos dias em que os reatores não receberam alimento, os mesmos não apresentaram picos de produção de biogás em razão da interrupção da alimentação.

O revestimento do chicle que é composto por sacarose e o recheio que é composto por açúcar invertido apresentaram rápida degradação nos experimentos. Esse fato foi detectado de forma visual entre as alimentações que apenas a base da goma de mascar restava dentro dos reatores. Mesmo no final dos 104 dias de experimento a base da goma de mascar ainda não havia sido degradada totalmente.

Observando o Gráfico 4 pode-se perceber um aumento expressivo na produção de biogás logo após a alimentação dos reatores, indicando que os substratos utilizados são hidrolisados e convertidos em metano com rapidez. Também pode-se vislumbrar que a produção de biogás decai da com a mesma rapidez devido a rápida digestão da sacarose e do açúcar invertido, componentes estes que possuem cadeias orgânicas de fácil e rápida assimilação pelos microrganismos responsáveis pela digestão anaeróbia.

#### **4.6 Marshmallow**

*Marshmallow* foi o substrato que apresentou os melhores resultados, tanto para geração de biogás como para concentração de metano, como pode ser observado nos Gráficos 1 e 2. O *marshmallow* apresentou concentração de matéria orgânica de 503 g O<sub>2</sub>/L. Todos os reatores em que foi utilizado esse substrato registraram dados até o final do experimento, não apresentando erros de registro.

Os reatores em que foi testado esse substrato foram os que receberam a menor carga orgânica, 2,52 g/semana, mas, em contrapartida, foram os que apresentaram maior produtividade de biogás e metano em relação aos outros substratos testados. Assim como os outros substratos, o *marshmallow* também foi digerido com rapidez. Esse fato pode ser explicado pela sua composição que é basicamente *high maltose* (glicose de milho), gelatina e glicose, componentes estes que são formados por cadeias moleculares de fácil assimilação pelos microrganismos responsáveis pela digestão anaeróbia. Para melhor apresentação, os resultados estão compilados na Tabela 9.

Tabela 9 - Resultados obtidos para o *marshmallow*

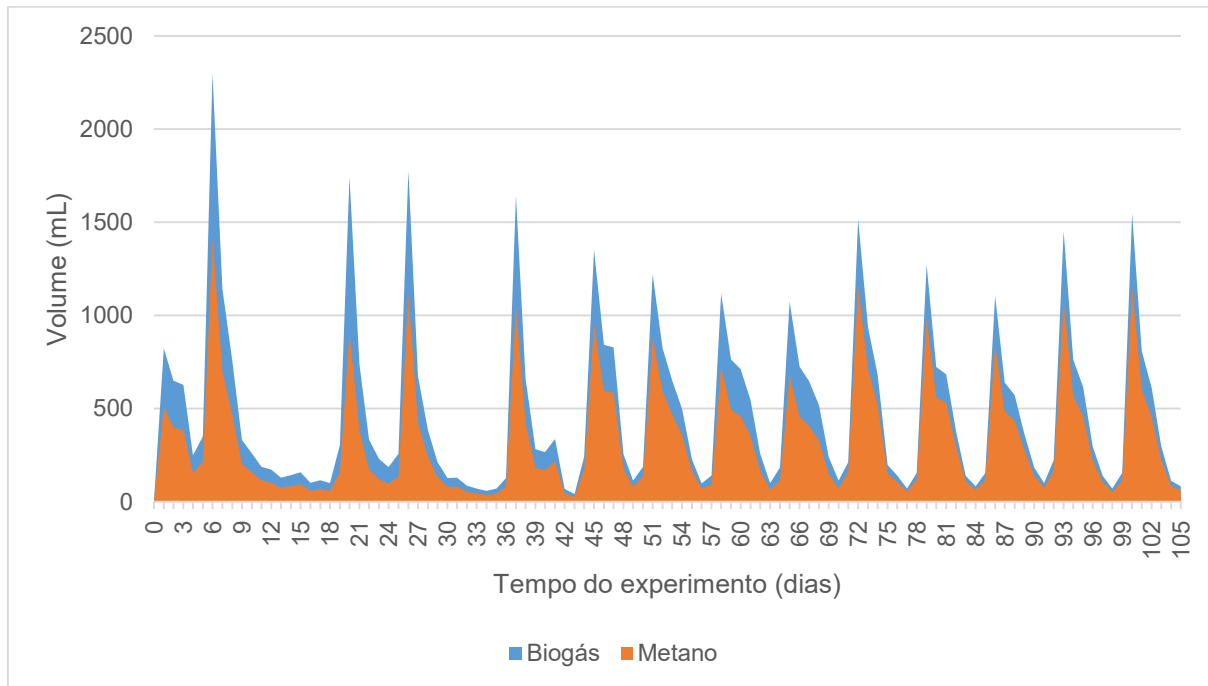
	<b>Substrato <i>Marshmallow</i></b>
<b>Tempo de experimento (dias)</b>	104
<b>Volume de Biogás do Controle (mL)</b>	7.717,8 ( $\pm$ 162 mL)
<b>Volume Total de Biogás (mL)</b>	51.429,4 ( $\pm$ 463 mL)
<b>Média Diária de Biogás (mL)</b>	489,8
<b>Teor Médio de Metano (%)</b>	68,49
<b>Volume Total de Metano (mL)</b>	34.733,92 ( $\pm$ 312 mL)
<b>Média Diária de Metano (mL)</b>	330,8

Pode ser observado na Tabela 9 que, ao final dos experimentos, o substrato *marshmallow* gerou 51,4L de biogás com 68,49% de teor de metano. Esses resultados são semelhantes aos obtidos por Cataneo (2015) que utilizou, em seus experimentos com reatores de bancada, glicerol a 3% do volume do reator. Em relação a concentração de metano, os resultados obtidos para esse substrato foram próximos aos obtidos por Konrad (2010), Backes (2011), Mafaciolli (2012), Minho (2012) e Cataneo (2015).

Os reatores que foram alimentados com o substrato *marshmallow*, mesmo recebendo menor concentração de carga orgânica, foram os que apresentaram maior incremento na produção de biogás, alcançando 566,37% em relação ao controle.

Para melhor visualização do volume de biogás *versus* o volume de metano gerado pelo substrato *marshmallow* foi plotado o Gráfico 5 em que seguem apresentados os volumes de biogás representados pela cor azul e os volumes de metano representados pela cor laranja.

Gráfico 5 - Volume de Biogás versus metano nos reatores do *marshmallow*



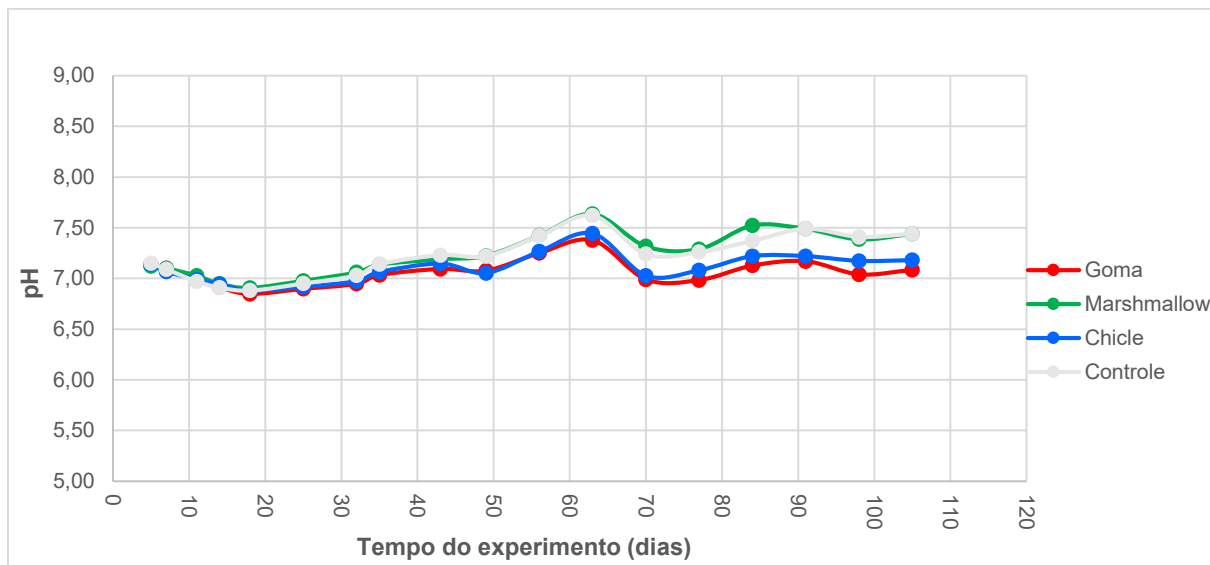
Observando o Gráfico 5 pode ser observada a rápida elevação na produção de biogás após as alimentações com os picos atingindo mais de 1L de produção de biogás. O maior pico de produção de biogás e metano ocorreu no dia 6. Todos os picos de geração de biogás ultrapassaram 1.000 mL

#### 4.7 pH

O pH dos reatores, inclusive do controle, foi monitorado com periodicidade semanal. Com os resultados obtidos foi plotado um gráfico para sua melhor apresentação. Abaixo segue o Gráfico 3 com os resultados de pH.



Gráfico 6 - Acompanhamento do parâmetro pH



Para obter-se uma boa eficiência no processo de digestão anaeróbia, é necessário manter o pH do sistema em uma faixa estável de 6,5 a 7,5. A manutenção do pH nessa faixa pode ser dada por tamponamento através da relação ácido carbônico/carbonato. No momento em que esta estabilidade é rompida e toda alcalinidade foi consumida, ocorre acúmulo de ácidos voláteis no sistema que contribuem para redução do pH, caracterizando instabilidade química no sistema de digestão anaeróbia (ZILOTTI, 2012).

Observando o Gráfico 6 pode-se verificar que o pH dos reatores se manteve na faixa entre 6,6 e 7,4, considerada ótima para crescimento dos microrganismos produtores de metano por Chernicharo (1997). Podem ser observados alguns pontos em que o pH de alguns reatores atingiu valores acima de 7,4, porém segundo o autor é possível conseguir estabilidade na geração de metano com valores de pH até 8,0.

O pH inicial das misturas (inoculo + substrato) variou de 7,12 a 7,15. No decorrer dos experimentos o pH de todos os reatores sofreu leves variações, se mantendo sempre dentro da faixa considerada ótima para geração de biogás.

No decorrer do experimento, após as alimentações iniciais, foi detectada leve redução de pH em todos os reatores. A partir do dia 18, o pH de todos os reatores passou a subir, indicando a produção de alcalinidade pelo sistema de digestão

anaeróbia para manutenção do seu equilíbrio. Os reatores em que foi testado o substrato *marshmallow* atingiram valor máximo de 7,62 no dia 63.

Observando o Gráfico 6, pode-se perceber que o pH de todos os reatores acompanhou o comportamento do controle, resultados estes mostram que os substratos testados foram muito bem aceitos pelo inoculo.

#### 4.8 Demanda química de oxigênio (DQO)

Segundo Rabelo (2010), o parâmetro DQO permite que seja avaliada a fração de matéria orgânica existente em uma amostra sólida ou líquida propícia a sofrer oxidação química. A DQO pode ser relativa a quantia de matéria carbonácea disponível para ser convertida em metano e biogás.

Backes (2011) observou elevação do parâmetro DQO em seus experimentos após a adição da glicerina. A autora explica que em razão da elevação da DQO e curto período de aclimação dos microrganismos ocorreu sobrecarga orgânica nos reatores reduzindo o teor de metano do biogás produzido.

Nos experimentos de Holm-Nielsen et al. (2008) foi utilizado esterco, resíduos de indústria alimentícia e glicerina de 0% a 6,5% do volume do reator. Os autores declaram que acima destas proporções testadas, ocorre sobrecarga orgânica e a taxa de produção de metano decai, podendo ser interrompida.

Antes de iniciar os testes, foram realizados ensaios de DQO do inoculo e dos substratos a serem utilizados. No término dos experimentos também foram realizados ensaios de DQO do lodo digerido dos reatores.

Após os 134 dias do experimento pode-se verificar que no reator controle houve a redução da DQO do meio em 3 gO<sub>2</sub>/L, passando de 55 gO<sub>2</sub>/L para 52 gO<sub>2</sub>/L. Esse resultado explica a produção de biogás nesse reator.

Também foram realizadas análises de DQO do meio reacional dos reatores em que foram testados os substratos bala de goma, chicle e *marshmallow*, os

resultados obtidos foram de 56 gO<sub>2</sub>/L, 67,5 gO<sub>2</sub>/L e 57,5 gO<sub>2</sub>/L respectivamente. Pode-se perceber que em todos os casos ocorreu incremento na DQO do meio. O valor mais elevado para o substrato chicle pode ser explicado pela base de goma de mascar não ter sido totalmente degradada contribuindo para elevação da DQO do meio.

#### 4.9 Sólidos voláteis totais

A concentração de sólidos voláteis após a digestão anaeróbia, indicada por Chernicharo (1997), é de 50%. O autor explica que essa concentração se deve a possibilidade da existência de matéria não biodegradada pelo lodo, e considera que esta condição resulta em boa eficiência do processo de digestão anaeróbia na remoção de matéria orgânica.

Kubaská et al. (2010) salientam a importância da análise sólidos voláteis para avaliação do rendimento de biogás. Segundo os autores, esse rendimento está associado ao volume de biogás produzido por unidade de sólidos voláteis presente no substrato, aplicado no reator por um período de tempo regular e sob uma determinada temperatura.

Foi realizada análise de sólidos voláteis totais com amostras do controle no início e ao final dos experimentos, já as amostras do líquido reacional dos reatores foram realizadas apenas no fim dos experimentos. Os valores obtidos estão apresentados na Tabela 10 abaixo:

Tabela 10 - Resultados de sólidos voláteis totais

	<b>Sólidos Totais (mg/L)</b>	<b>Sólidos Voláteis Totais (mg/L)</b>	<b>Sólidos Fixos Totais (mg/L)</b>
<b>Controle Inicial</b>	56.000	49.000	7.000
<b>Controle final</b>	29.200	19.000	10.200
<b>Líquido Reacional Bala de Goma</b>	36.800	26.400	10.400
<b>Líquido Reacional Chiclé</b>	39.600	29.800	9.800
<b>Líquido Reacional <i>Marshmallow</i></b>	36.400	27.400	9.000

Analisando a Tabela 10, pode ser verificado que a concentração de sólidos voláteis do controle na condição inicial era de 49.000 mg/L, indicando alta concentração de matéria orgânica. No final do experimento o reator controle apresentou resultados de 19.000 mg/L de sólidos voláteis, indicando que a matéria orgânica foi consumida e convertida em biogás.

Observa-se na Tabela 10 que os valores de sólidos totais e sólidos voláteis do lodo digerido reduziram e os sólidos fixos aumentaram, para todos os substratos utilizados. Esses resultados indicam boa eficiência do processo de digestão anaeróbia na conversão da matéria orgânica em biogás. O mesmo comportamento pode ser observado para o branco, porém o mesmo não foi alimentado, apenas consumiu a matéria orgânica contida no inoculo.

As amostras de lodo digerido em que foram utilizados os substratos de bala de goma e *marshmallow* atingiram valores próximos a 50% de sólidos voláteis em relação ao inoculo inicial, conforme indicado por Chernicharo (1997). Porém as amostras de lodo digerido em que foi aplicado o substrato chicle apresentaram resultados de 60 % de sólidos voláteis em relação ao inoculo inicial, demonstrando novamente a dificuldade do sistema em digerir a base de goma de mascar.

#### **4.10 Biofertilizante**

Conforme a Instrução Normativa nº 64, de 18 de dezembro de 2008, do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), entende-se por biofertilizante: “Todo produto que contenha componentes ativos ou agentes biológicos, capaz de atuar de forma direta ou indireta, sobre o todo ou parte das plantas cultivadas, melhorando o desempenho do sistema de produção e que seja isento de substâncias proibidas pela regulamentação de orgânicos.”

Não foi encontrada regulamentação específica, nem padrões de concentração de nutrientes para utilização de biofertilizantes, apenas algumas informações genéricas em duas Instruções Normativas do MAPA. Abaixo seguem:

Instrução Normativa Secretaria de Defesa Agropecuária (SDA) nº 25, de 23 de julho de 2009 trata de biofertilizantes na seção VII, Art. 11. “Para biofertilizantes, desde que respaldadas pela pesquisa oficial brasileira, as garantias e especificações serão aquelas declaradas no processo de registro de produtos.”

Instrução Normativa MAPA nº 6, de 10 de março de 2016, trata no capítulo VII os requisitos mínimos para avaliação da viabilidade e eficiência agrônômica e elaboração do relatório técnico-científico para fins de registro de produto novo – fertilizante, corretivo, biofertilizante, substrato para plantas e remineralizadores. O artigo nº 37 inciso 4 diz que: “quando se tratar de biofertilizante, demonstrar que o produto atua, isolada ou cumulativamente, no crescimento, na ontogenia, em variáveis bioquímicas e na resposta a estresses abióticos, elevando a produtividade da cultura.”

Dessa forma serão apresentados os parâmetros de nitrogênio e fósforo obtidos do lodo digerido, mas para validar sua efetividade é recomendada a realização de testes com diferentes espécies de plantas seguindo as instruções normativas do MAPA.

A Tabela 11 abaixo mostra os valores obtidos para os parâmetros de nitrogênio e fósforo do líquido reacional após o término dos experimentos.

Tabela 11 - Valores de concentração de nitrogênio e fósforo.

	Concentração de N (mg/L)	Concentração de P (mg/L)
<b>Controle inicial</b>	1.061,47	123,63
<b>Líquido Reacional Bala de Goma</b>	694,67	121,5
<b>Líquido Reacional Chicle</b>	1.278,69	120,78
<b>Líquido Reacional <i>Marshmallow</i></b>	555,33	158,69

Como pode ser observado na Tabela 11 os valores de nitrogênio são bem variáveis entre as amostras, com valores variando entre 555 e 1.278 mg/L. Nas amostras de bala de goma e *marshmallow* os valores obtidos indicam remoção desse nutriente em relação ao controle inicial. As amostras do substrato chicle apresentaram valores superiores ao controle inicial, indicando incremento no parâmetro. Esse

incremento pode ser atribuído a base da goma de mascar que não foi digerida por completo ao final dos experimentos.

Observando os valores obtidos para o parâmetro fósforo verifica-se que as amostras apresentaram resultados muito próximos do controle inicial na faixa de 120 mg/L, exceto o *marshmallow* que apresentou valor de 158,69 mg/L, indicando incremento nesse parâmetro em relação ao controle inicial.

## 5 CONCLUSÃO

Analisando os resultados obtidos nos experimentos pode-se concluir que os substratos utilizados apresentaram resultados satisfatórios, tanto para geração de biogás como para concentração de metano. O teor de metano variou entre 58% e 68%, valor este considerado bom por autores como Konrad (2010) e Minho (2012)

Com base nos resultados dos testes preliminares, constatou-se que as dosagens de carga orgânica nas concentrações acima de 16,7 g/semana para bala de goma, 9,4 g/semana para chicle e 7,5 g/semana para o *marshmallow* causam colapso total do sistema de digestão anaeróbia.

Em relação ao controle, os substratos bala de goma, chicle e *marshmallow* apresentaram incremento na produção de biogás de 426,51%, 547,14% e 566,37%, respectivamente. Esses resultados demonstram o grande potencial desses produtos para geração de biogás.

Apesar do chicle ter apresentado resultados satisfatórios, sua utilização como substrato para digestão anaeróbia se torna desinteressante. Isto se deve à lenta degradação da base de goma de mascar que ainda se mostrava presente no lodo após os 134 dias do experimento. Como esse resíduo é sólido, é provável que o mesmo cause problemas operacionais para reatores ou biodigestores operados em escala real, como deposição de fundo e entupimento de tubulações. A compostagem ainda se mostra a melhor forma de disposição para esse resíduo.

O biofertilizante resultante do processo de digestão anaeróbia de doces é rico em nutrientes N e P, favorecendo sua incorporação em solo agrícola como adubo orgânico.

### **5.1 Sugestões para trabalhos futuros**

Para trabalhos futuros é sugerido testar os substratos elevando a dosagem de substrato de forma gradativa de 1 até 3 unidades, para testar a eficiência do sistema de digestão anaeróbia e encontrar o valor máximo de carga orgânica que pode ser aplicado para esses substratos.

Também é sugerida a realização de testes utilizando esses produtos como cosubstratos para incremento na produção de biogás e metano.

O biofertilizante resultante do processo de digestão anaeróbia de doces pode ser utilizado para a realização de testes de desenvolvimento e produtividade de plantas.



## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, Fábio Viana. **Biogás**: Economia, Regulação e Sustentabilidade. Rio de Janeiro: Interciência, 2014. 196 p.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Atlas de Energia Elétrica no Brasil. 3. ed. Brasília, 2008.

APHA, AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. Standard methods for the examination of wastewater. 20th ed. New York, USA: APHA, 2005.

AQUINO S. F.; CHERNICHARO, C. A. L. Acúmulo de ácidos graxos voláteis (AGVs) em reatores anaeróbios sob estresse: causas e estratégias de controle. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 10, n.2, p. 152-161, 2005.

BACKES, M. G. Avaliação do processo de digestão anaeróbia na geração de energia a partir de dejetos suínos e bovinos de leite com suplementação de glicerina residual bruta oriunda da produção de biodiesel. Dissertação (Mestrado). Curso de Pós-Graduação em Ambiente e Desenvolvimento, Centro Universitário Univates, Lajeado, 2011.

BARICHELO, Rodrigo; HOFFMAN, Ronaldo; SILVA, Susane O. C.; DEIMLING, Moacir F.; FILHO, Nelson C. O Uso de Biodigestores em Pequenas e Médias Propriedades Rurais com Ênfase na Agregação de Valor: Um Estudo de Caso na Região Noroeste do RS. Maringá, v.8, n.2, p. 333 – p. 355, 2015.

BEDUSCHI, L. C.; ORTOLANI A. F. & COAN, O. Considerações gerais sobre a estação da UNESP de biogás automotivo a baixa pressão, in II encontro sobre biogás automotivo - Coletânea dos trabalhos apresentados, EMBRATER, Serviço de extensão rural, EMBRATER/UNESP, Jaboticabal, 1985. Disponível em: <<http://www.nipeunicamp.org.br/agrener/anais/1996/cap12.pdf?3bc2dbeb0a7bf779fe39c865b70b3b3f=d2575ef2f02e0b089bd6c44964e3b419>>. Acesso em 19 abr. 2017.

BITTON, G.; Wastewater Microbiology, 3rd ed., Canada, Wiley, 2005.

FUNDAÇÃO ECOLÓGICA NACIONAL (FEN). Biogás. Disponível em: <<http://fen.org.br/wp-content/uploads/2013/05/Fontes-Alternativas-de-Energia.pdf>>. Acesso em 20 dez. 2017.

BLEY JR., Cícero; GALIKIN, Maurício. **Agroenergia da Biomassa Residual: Perspectivas Energéticas, Socioeconômicas e Ambientais**. Foz do Iguaçu: Technopolitik, 2009. 2ª ed. 140 p.

CAPAZ, Rafael Silva; NOGUEIRA, Luiz Augusto Horta. **Ciências Ambientais para Engenharia**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014. 354 p.

CARRILHO, Nuno Filipe Queiroga. Valorização de Bio-resíduos Alimentares por Digestão Anaeróbia Descentralizada – Caso de Estudo: Campus da FCT/UML. 2012. 126 f. Dissertação (Mestrado em Energia e Bioenergia) – Universidade Nova de Lisboa, Lisboa 2012.

CASSINI, Servio Túlio. **Digestão de Resíduos Sólidos Orgânicos e Aproveitamento do Biogás**. Rio de Janeiro: ABES, RiMa, 2003. 196 p.

CATANEO, Indianara; Comparativo do potencial de produção de metano utilizando glicerol e sacarose como substrato orgânico, em reatores operados de forma descontínua alimentada. Engenharia Ambiental. CETEC. Centro universitário Univates. Lajeado, 2015.

CHERNICHARO, Carlos Augusto Lemos. **Reatores Anaeróbios**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMF, 1997. Volume 5, 2ª ed. 588 p.

COOPERATIVA DO CITRICULTORES DO VALE DO CAÍ (ECOCITRUS). Disponível em: <http://www.ecocitrus.com.br/index.php/produtos-servicos-recebimento-tratamento-residuos>>. Acesso em: 18 abr. 2017.

COSTA, David Freire. Geração de Energia a Partir do Biogás de Tratamento de Esgoto. 2006. 194 f. Dissertação (Mestrado em Energia) – Universidade de São Paulo USP, São Paulo/SP. 2006.

DEGANUTTI, Roberto; PALHACI, Maria do Carmo J. P.; ROSSI, Marco; TAVARES, Roberto, SANTOS, Claudemilson. Biodigestores Rurais: Modelo Indiano, Chinês e Batelada. Departamento de Artes e Representação Gráfica, FAAC, UNESP, Bauru, 2009. Disponível em: <[https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Biodigestores\\_000g76qdzv02wx5ok0wtedt3spdi71p.pdf](https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Biodigestores_000g76qdzv02wx5ok0wtedt3spdi71p.pdf)>. Acesso em 17 abr. 2017.

DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. Biogas from Waste and Renewable Resources. Ed. Wiley-VCH, 2008.

DIAZ, G. O. Análise de Sistemas para o Resfriamento de Leite em Fazendas Leiteiras com o Uso do Biogás Gerado em Projetos MDL. 2006. 162 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade de São Paulo - USP. São Paulo/SP. 2006.

ECODOMUS Construções Sustentáveis. Disponível em: <http://denishamai.wixsite.com/ecodomus/vila-ecologica-santa-rita>. Acesso em 14 abr. 2017.

FARIA, Rui Alexandre Pereira. Avaliação do potencial de geração de biogás e de produção de energia a partir da remoção da carga orgânica de uma estação de tratamento de esgoto – Estudo de caso. 2012. 76 f. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE. Cascavel/PR. 2012.

FERNANDES, Carlos. Digestão Anaeróbia. 2009. Disponível em: <<http://www.dec.ufcg.edu.br/saneamento/DigeAnae.html>>. Acesso em 19 abr. 2017.  
FRANÇA Jr., Antonio Tavares de; Análise do aproveitamento energético do biogás produzido numa estação de tratamento de esgoto. Ilha Solteira, SP. Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica. 2008.

GASPAR, Rita Maria Bedran Leme. Utilização de Biodigestores em Pequenas e Médias Propriedade Rurais com Ênfase na Agregação de Valor: Um Estudo de Caso na região de Toledo – PR. 2003. 106 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento e Estratégia Organizacional) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis/SC. 2003.

GOLDEMBERG, José; LUCON, Oswaldo. Energia e meio ambiente no Brasil. São Paulo, SP: Estudos avançados, 2007. Disponível em: <[http://www.ambiente.sp.gov.br/proclima/files/2014/04/3\\_energia\\_meio\\_ambiente.pdf](http://www.ambiente.sp.gov.br/proclima/files/2014/04/3_energia_meio_ambiente.pdf)>. Acesso em: 29 mai. 2017.

GOLDEMBERG, José; **Energia e Desenvolvimento Sustentável:** Série Sustentabilidade. São Paulo: Blucher, 2010. Volume 4. 94 p.

GOLDEMBERG, José; PALETTA, Francisco Carlos. **Energias Renováveis:** Série Energia e Sustentabilidade. São Paulo: Blucher, 2012. Volume 1. 110 p.

GUIA PRÁTICO DO BIOGÁS – GERAÇÃO E UTILIZAÇÃO. 5ª edição, totalmente revista e atualizada, Gülzow, 2010. Publicado pela Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), com o apoio do Ministério da Nutrição, Agricultura e Defesa do Consumidor da Alemanha, em virtude de uma decisão do Parlamento Federal Alemão. Disponível em: <[http://www.resol.com.br/cartilhas/giz\\_-\\_guia\\_pratico\\_do\\_biogas\\_final.pdf](http://www.resol.com.br/cartilhas/giz_-_guia_pratico_do_biogas_final.pdf)>. Acesso em: 31 mar. 2015.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. Fundamentos de Física 2. 8.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

HARRIS J. M.; ROACH B. Environmental and Natural Resource Economics: A Contemporary Approach, Tufts University, Medford, MA, USA, 2013.

HERCULANO, Mariellen Cristina Rosa; SOUZA, Amilton Diniz. Biodigestores: Cartilha de Manejo. **Boletim Técnico IFTM**, Uberaba, ano 2, n. 1, p. 14-19, 2016. Disponível

em < <http://editora.iftm.edu.br/index.php/boletimiftm/article/view/121>>. Acesso em: 17 abr. 2017.

HOLM-NIELSEN, J. B.; LOMBORG, C. J.; OLESKOWIKZ-POPIEL, P.; ESBENSEN, K. H. On-line near infrared monitoring of glycerol-boosted anaerobic digestion process: evaluation of process analytical technologies. *Biotechnology and Bioengineering*, v.99, n.2, p.302-313. Fev. 2008.

HOOK M.; TANG X. Depletion of fossil fuels and anthropogenic climate change - A review, **Enege Policy**, n.52, p.797-809, 2013.

IANNICELLI, André L. Reaproveitamento energético de uma empresa cervejeira. 2008. 84f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de Taubaté, Taubaté, 2008.

ICLEI – BRASIL. **Manual para Aproveitamento do Biogás**: Efluentes Urbanos. São Paulo: ICLEI BRASIL, 2010. Volume 2, 77 p.

IENGEP Soluções em Sustentabilidade. Disponível em: [http://www.iengep.com.br/novo/index.php?option=com\\_content&view=article&id=38&Itemid=27](http://www.iengep.com.br/novo/index.php?option=com_content&view=article&id=38&Itemid=27). Acesso em 17 abr. 2017.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE), Plano Nacional de Saneamento Básico, Rio de Janeiro, 2010.

JORDÃO, Eduardo Pacheco, PESSÔA, Constantino Arruda. **Tratamento de Esgotos Domésticos**. Rio de Janeiro: ABES, 2014. 7ª ed. 1.087 p.

KARLSSON, Tommy. **Manual Básico de Biogás**. Lajeado: Editora da UNIVATES, 2014. 69 p.

KAPDAN, I.K.; KARGI, F. Bio-hydrogen production from waste materials. **Enzyme and Microbial Technology**, v. 38, p. 559-582, 2006.

KONRAD, Odorico; HEBERLE, A. N. A.; CASARIL, C. E.; KAUFMANN, G. V.; LUMI, Marluce; DALL'OGGIO, Michel; SCHIMITZ, Michele. Avaliação da produção de biogás e geração de metano a partir de lodo de estação de tratamento de efluentes e glicerina residual CETEC/UNIVATES. **Revista destaques acadêmicos**, ano 2 , n. 4 , 2010.

KUBASKÁ, M; SEDLÁČEK, S.; BODÍK, I; KISSOVÁ, B. Food Waste as Biodegradable Substrates for Biogas Production. In: 37th International Conference of SSCHE. Tatranské Matliare, Slovakia, 2010.

LEITE, Valderi D.; LOPES, Wilton S.; PRASAD, Shiva. Bioestabilização Anaeróbia de Resíduos Sólidos Orgânicos em Reatores de Batelada. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 2001, vol.5, n.1, p.119-123. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1415-43662001000100022&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662001000100022&lng=en&nrm=iso)>. ISSN 1415-4366>. Acesso em: 21 mai. 2017.

LINDEMEYER, R. M. Análise da viabilidade econômica-financeira do uso do biogás como fonte de energia elétrica. Florianópolis, SC: 2008.

LÓPES, J. A. S.; MARTIN SANTOS, M. G.; PÉREZ, A. F.C.; MARTÍN, A. M. Anaerobic digestion of glycerol derived from biodiesel manufacturing. **Bioresource Technology** Vol. 100, N 23, 5609-5615, 2009.

LORA, Electo Eduardo Silva; VENTURINI, Osvaldo José. **Biocombustíveis**. Rio de Janeiro: Interciência, 2012. 1.200 p.

MAFACIOLLI, Débora. Produção de biogás através do processo de digestão anaeróbia utilizando dejetos de aves de postura com suplementação de glicerina bruta. Engenharia Ambiental. CETEC. Centro universitário Univates. Lajeado, 2015.

MAYER, Mateus Cunha. Estudo da influência de diferentes inóculos no tratamento anaeróbio de resíduos sólidos orgânicos. 2013. 70 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental) - Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande/ PB, 2013.

METCALF & EDDY, Wastewater Engineering, Treatment and Reuse; McGraw Hill Publishing Co., New York 2003.

MINHO, C. V.; KONRAD, Odorico; KOCH, F. F.; KLEINSCHMITT, A. B.; CASARIL, Camila; LUMI, Marluce. Uso da glicerina residual na geração de biogás a partir do lodo de estação de tratamento de efluentes e dejetos de aves poedeiras. **Engenharia Ambiental** – Espírito Santo do Pinhal, v. 9, n. 3 p. 041 – 050, 2012.

OLIVEIRA, R. D. Geração de energia elétrica a partir do biogás produzido pela fermentação anaeróbia de dejetos em abatedouro e as possibilidades no mercado de carbono. Trabalho de conclusão de curso (graduação) – Curso de Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Energia e Automação, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2009.

OLIVER, André de Paula Moniz. **Manual de Treinamento em Biodigestão**. Salvador: Winrock, 2008. 23 p.

OSTREM, K., NICKOLAS J., (2004). Greening waste: Anaerobic Digestion for treating the organic fraction of municipal solid wastes. Disponível em: [http://www.seas.columbia.edu/earth/wtert/sofos/Ostrem\\_Thesis\\_final.pdf](http://www.seas.columbia.edu/earth/wtert/sofos/Ostrem_Thesis_final.pdf). Acesso em: 27 mai. 2017.

PETROBRÁS DISTRIBUIDORA S/A. Biocombustíveis. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/areas-de-atuacao/producao-debiocombustiveis/>>. Acesso em: 07 mai. 2017.

PIEROBON, L.R.P. Sistema de Geração de Energia de Energia de Baixo Custo utilizando biogás proveniente de Aterro Sanitário. 2007. 154 f. Tese (Doutor em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre/ RS. 2007.

PROINFA. Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica. Disponível em: <[http://www.mme.gov.br/programas/proinfa/menu/programa/tecnologias\\_contempladas.html](http://www.mme.gov.br/programas/proinfa/menu/programa/tecnologias_contempladas.html)>. Acesso em: 2017.

ROBRA S. Uso da glicerina bruta em biodigestão anaeróbica: Aspectos Tecnológicos, ambientais e ecológicos. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Santa Cruz, Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente. Ilhéus, 2006.

RODRIGUES, Ana Alice Lopes de Sousa. Co-Digestão Anaeróbia de Resíduos de Natureza Orgânica. 2005. 164 f. Dissertação (Mestrado em Gestão Ambiental, Materiais e Valorização de Resíduos) – Universidade de Aviero, Aviero/Portugal, 2005.

RORATTO, Lucas. Análise e Construção de um Biodigestor para Pequenas Propriedades Rurais. Trabalho de Final de Curso, pelo Curso de Engenharia Mecânica da Faculdade de Horizontina. Horizontina, 2014. Disponível em: <[http://www.fahor.com.br/publicacoes/TFC/EngMec/2014/Lucas\\_Roratto.pdf](http://www.fahor.com.br/publicacoes/TFC/EngMec/2014/Lucas_Roratto.pdf)>. Acesso em: 17 abr. 2017.

SALOMON, K. R.; LORA, E. E. S. Estimate of the electric energy generating potencial for different sources of biogas on Brazil. **Biomass and Bioenergy**, n. 33, p. 1101-1107, 2009.

SANT'ANNA, Geraldo Lippel. **Tratamento Biológico de Efluentes**: Fundamento e Aplicações. Rio de Janeiro: Interciência, 2010. 424 p.

SEIXAS, Jorge et al. Construção e funcionamento de biodigestores. Brasília: EMBRAPA - DID, 1980. EMBRAPA-CPAC. Circular técnica, 4.

SOUTO, G. D. B.; Efeito da Variação Gradual da Taxa de Recirculação do Lixiviado em Reatores Anaeróbios Híbridos na Digestão da Fração Orgânica dos Resíduos Sólidos Urbanos. Dissertação de Mestrado - Escola de engenharia de São Carlos, Área: Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo, 2005.

SUZUKI, Ana Beatriz Prenzier; FERNANDES, Dangelia Maria; FARIA, Rui Alexandre Pereira; VIDAL, Thais Cristina Moraes. **Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias**, Guarapuava-PR, v.4, n.1, p.221–237, 2011.

TEIXEIRA, A. R.; CHERNICHARO, C. A. L.; AQUINO, S. F. Influência da redução do tamanho de partículas na taxa de hidrólise de esgoto bruto doméstico. **Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental**, vol. 13, nº 4, p.405-415, 2008.

VELOSO, Alex Viana; SOUZA, Wilson L.; ARAUJO, Paulo Mário M.; Sant'Anna, Mikele C. de Souza; ALMEIDA, Karla T. C. de Almeida; SILVA, Isabelly Pereira. Análise Dimensional de um Biodigestor Piloto Baseado no Modelo Indiano Utilizando Resíduos Alimentares. In: Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 6., 2010, Campina Grande.

WANG, Y.; ZHANG, Y.; WANG, J.; GRAYDON, J. W. Analysis of small-scale biogás utilization systems on Ontario cattle farms. **Renewable Energy**, 36, p. 1019-1025, 2011.

ZHU, B.; CIKAS, P.; ZHANG.; LORD, J; JENKINS, B.; LI, X.; Characteristics and Biogas Production Potencial of Municipal Solid Wastes Pretreated With a Rotary Drum Reactor. **Bioresource Technology** 100, 1122-1129, 2009.

ZILOTTI, H. A. R.. Potencial de produção de biogás em uma estação de tratamento de esgoto de Cascavel para a geração de energia elétrica. 2012. 39 f. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) - UNIOESTE, Cascavel, 2012.

